

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA: INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Título de:

INGENIEROS MECÁNICOS

TEMA:

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN
AEROGENERADOR PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN
LA ZONA DE CAYAMBE**

AUTORES:

EDWIN CESAR LECHÓN NECPAS

ISRAEL ALEXANDER ZHUNGUR SOLIS

TUTOR:

WASHINGTON SALVATORE REINA GUZMAN

Quito, Octubre 2016

Declaratoria de responsabilidad y autorización de uso del Trabajo de Titulación

Nosotros Edwin Cesar Lechón Necpas e Israel Alexander Zhungur Solís, con documentos de identificación N°1721886222 y 1722657416, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de grado/titulación intitulado: “Estudio de factibilidad para la implementación de un aerogenerador para generación de energía eléctrica en la zona de Cayambe”, el mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada.

En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final, en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Edwin Cesar Lechón Necpas

CI: 1721886222



Israel Alexander Zhungur Solís

CI: 1722657416

Carta de declaración de coautoría

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación Estudio de factibilidad para la implementación de un aerogenerador para generación de energía eléctrica en la zona de Cayambe realizado por los estudiantes Edwin Cesar Lechón Necpas e Israel Alexander Zhungur Solís, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito agosto 2016



Washington Salvatore Reina Guzmán

CI: 1712766909

Agradecimiento

Agradecemos a la Universidad Politécnica Salesiana, a todos los docentes de la Carrera de Ingeniería Mecánica que en el transcurso de los semestres aportaron con conocimiento a cada uno de nosotros y en especial a nuestro director de proyecto Ingeniero Salvatore Reina quien, día a día, nos compartió sus experiencia y sabiduría, lo cual nos aportó para que hoy podamos alcanzar el objetivo de Ingenieros Mecánicos.

Dedicatoria

Edwin

Dedico este proyecto a mis padres Federico Lechón y Susana Necpas, por todo el apoyo que me brindaron durante estos años de estudio. A mi esposa Fernanda Flores por no permitir darme por vencido en los momentos más difíciles.

Israel

Dedico este proyecto a Dios, a mis padres Darwin García y Alexandra Solis, por haber sido un ejemplo de esfuerzo, perseverancia y apoyo durante toda la carrera al no permitir darme por vencido ante este anhelado sueño, que hoy ya es una realidad.

Índice

Introducción	1
Objetivos	2
1. Capítulo I: Marco teórico.....	3
1.1. Energía Renovable	3
1.1.1. Importancia de la energía renovable	4
1.2. El Viento.....	4
1.3. Energía eólica	5
1.3.1. Aplicación de la Energía Eólica.....	6
1.3.2. Ventajas.....	6
1.3.3. Inconvenientes.....	7
1.3.4. La Energía Eólica A Nivel Mundial.....	7
1.4. Aerogeneradores.....	11
1.4.1. Tipos de aerogeneradores	11
1.4.1.1. Respecto a la posición de su eje	11
1.4.1.2. Respecto a la posición del equipo con referencia al viento	12
1.4.1.3. Respecto al número de palas	13
1.4.2. Partes principales de un aerogenerador	15
1.4.2.1. La hélice o rotor	15
1.4.2.2. Góndola.....	16
1.4.2.3. Turbina o caja de engranes.....	16

1.4.2.4. Generador	16
1.4.2.5. Torre.....	17
1.4.2.6. Sistema de control y protección	17
1.4.3. Equipo de medición de viento	18
1.4.4. Anemómetro.....	18
1.4.4.1. Anemómetro de cazoletas	18
1.4.4.2. Anemómetro digital tipo hélice.....	19
1.5. Colocación de los instrumentos de medida	20
2. Capítulo II: Evaluación del recurso eólico disponible.....	22
2.1. Localización	22
2.2. Instalación de Anemómetro y toma de medidas	24
2.2.1. Recopilación de datos	25
2.3. Cálculo de los datos Eólicos.....	26
2.3.1. Distribución de Weibull.....	28
2.3.1.1. Propiedades de la función de Weibull.....	29
2.3.1.2. Parámetros estadísticos de la distribución de Weibull.....	29
2.3.1.3. Parámetros de interés para cálculos energéticos	30
2.3.1.4. Cálculo de los parámetros de Weibull	31
2.4. Análisis de la Potencia Eólica Disponible.....	35
2.4.1 Selección de la turbina eólica	38
2.4.1.1 Cálculo de la potencia máxima del lugar de estudio.....	42
2.4.2. Análisis exergético.....	44

2.4.2.1. Modelo exergético eólico	44
2.4.3. Estimación del suministro de energía.....	47
3. Capítulo III: Estudio de Factibilidad Técnica	48
3.1. Valor Actual Neto (VAN):	48
3.1.1. Cálculo del Valor Actual Neto.....	52
3.3. Tasa Interna de Retorno (TIR):	53
4. Capítulo IV: Conclusiones y Recomendaciones	53
4.3. Conclusiones	53
4.4. Recomendaciones	54
Referencias.....	56

Índice de figuras

Figura. 1 Capacidad eólica acumulada instalada a nivel mundial.	8
Figura. 2 Países con mayor generación de energía eólica en el 2015	10
Figura. 3 Tipos de aerogeneradores verticales	12
Figura. 4 Aerogenerador respecto a la posición del equipo con el viento.	13
Figura. 5 Aerogenerador Multipalas	14
Figura. 6 Principales componentes del aerogenerador.....	15
Figura. 7 Anemómetro de cazoletas.....	19
Figura. 8 Anemómetro tipo hélice	20
Figura. 9 Influencia de un obstáculo en la circulación de viento.....	21
Figura. 10 Volumen de influencia de un obstáculo.....	21
Figura. 11 Mapa satelital de la comunidad La Chimba	22
Figura. 12 Instalación de anemómetro en el lugar de estudio.....	24
Figura. 13 Programa para la recopilación de datos.	25
Figura. 14 Lecturas registradas en el anemómetro.....	26
Figura. 15 Frecuencias de la velocidad de Viento.	28
Figura. 16 Densidad de probabilidad de Weibull para la velocidad.	34
Figura. 17 Frecuencia en las que la velocidad es superior a 2,5 m/s.	40
Figura. 18 Curva de potencia del aerogenerador.	41
Figura. 19 Curva de potencia máxima en función de la velocidad.	43
Figura. 20 Ingresos y egresos a obtener durante los diez años.	52

Índice de Tablas

Tabla 1. Energías renovables limpias	3
Tabla 2. Distribución de frecuencias del lugar de estudio.	27
Tabla 3. Cálculo de los datos estadísticos.....	32
Tabla 4. Cálculo de la densidad de probabilidad de Weibull.....	33
Tabla 5. Empresas proveedoras de sistemas eólicos.....	38
Tabla 6. Distribución de frecuencias del sector La Chimba 279 horas.....	39
Tabla 7 Características técnicas Aerogenerador ZONHAN ZH 1KW	40
Tabla 8. Potencia máxima del lugar de estudio.....	42
Tabla 9. Estimación del suministro de energía	47
Tabla 10. Valor de planillas eléctricas en dólares.....	49
Tabla 11. Valor de planillas eléctricas en dólares.....	49
Tabla 12. Ingresos y Egresos.	50
Tabla 13. Valor Actual Neto	52
Tabla 14. Criterio para evaluar el VAN	52
Tabla 15. Tasa de Interés de Retorno.....	53

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Función densidad de probabilidad.....	28
Ecuación 2. Relación Velocidad media y factor de escala.....	29
Ecuación 3. Frecuencia acumulada de las velocidades \geq a un valor de V.....	29
Ecuación 4. Frecuencia acumulada para velocidades $<$ a un valor de V	29
Ecuación 5. Velocidad media anual (a), La mediana (b), La varianza(c).....	29
Ecuación 6. Valor medio del cubo de las velocidades del viento.	30
Ecuación 7. Velocidad eficaz.....	30
Ecuación 8. Velocidad media anual/parámetro c:.....	30
Ecuación 9. Desviación estándar/velocidad media anual:	30
Ecuación 10. Factor de energía o factor de potencia eólica (Fe):.....	31
Ecuación 11. Ajuste por mínimos cuadrados	31
Ecuación 12. Factor de escala	31
Ecuación 13. Valor Coeficiente A de la recta	31
Ecuación 14. Valor Coeficiente B de la recta.	32
Ecuación 15. Energía Cinética	35
Ecuación 16. Caudal másico	35
Ecuación 17. Potencia disponible	35
Ecuación 18. Densidad de potencia por unidad de área.....	35
Ecuación 19. Densidad.....	35
Ecuación 20. Potencial eólico disponible en función de la V_m cúbica y de la V_m ...	36
Ecuación 21. Potencia máxima	42
Ecuación 22. Exergía de un proceso de flujo	44
Ecuación 23. Exergía	45
Ecuación 24.Exergía de la energía cinética.....	45

Resumen

El siguiente proyecto analiza la factibilidad para la implementación de un aerogenerador para la producción de energía eléctrica, y evaluar la posibilidad de usarlo en la comunidad La Chimba perteneciente a la Parroquia Olmedo, Cantón Cayambe-Provincia de Pichincha. Esta investigación busca contribuir con una posible solución para el desabastecimiento de energía eléctrica en el sector, aprovechando la alta velocidad de viento que existe en esta zona.

El siguiente proyecto muestra una breve explicación sobre la historia, evolución, características climáticas, demanda, requisitos máximos y mínimos de instalación, así como las ventajas y desventajas que tiene la energía renovable.

La comunidad La Chimba presenta un déficit eléctrico debido a los apagones y al costo de las planillas de electricidad, por tal motivo se deben buscar nuevas alternativas que sean amigables con el ambiente y a su vez, accesibles para todos, de manera que brinde ayuda a toda la comunidad.

Durante la investigación se seleccionó la mejor alternativa de aerogenerador, el cual satisfacía todas las necesidades, tratando de reducir costos de instalación y operación, ya que el aerogenerador debe ser accesible a la economía del pueblo.

Si los resultados de la investigación muestran factibilidad, se solucionaría el problema de electricidad del sector, ya que el aerogenerador podría brindar energía a más hogares del lugar y así varias familias se verían beneficiadas debido a que sus opciones de negocios aumentarían, así como su economía.

Más allá de que esta sea una simple investigación, este trabajo trata de dar una suficiente información técnica para implementar la aplicación de un aerogenerador en la comunidad La Chimba perteneciente al Cantón Cayambe.

Abstract

The following titling project analyzes the feasibility of the implementation of a wind turbine for generating electricity, and also it wants to evaluate the possibility of its use in the community La Chimba parish in Olmedo - Cayambe, Pichincha Province.

This research tries to contribute to the solution for electricity problem in this sector, taking advantage of the high-speed wind that exists in this area.

The subsequent project clarifies a brief explanation of the history, evolution, characteristics climate, demand, maximum and minimum installation requirements as well as the advantages and disadvantages of renewable energy.

The community La Chimba presents electricity deficit due to blackouts and the cost of the electricity payrolls.

For these reasons, this research looks for new alternatives of electricity, which are friendly with the environment and accessible for the community of this parish.

During the investigation it was selected the best alternative wind turbine, which satisfied all needs, trying to reduce installation and operating costs. Moreover, the wind turbine must be accessible to the economy of the town.

If the result of this research shows feasibility the electricity problems in La Chimba parish would be solved. The wind turbine could provide energy to enough homes and many people would be benefited because their business will increase, as well as their economy.

Beyond to be a common research, this work tries to give sufficient technical information to implement the application of a wind turbine in La Chimba in Cayambe.

Introducción

En la actualidad, la demanda de energía eléctrica se incrementa en los sectores urbanos y rurales, esto se da por el nuevo estilo de vida de las personas. En el Ecuador, el crecimiento constante de la población y un notable incremento de industrias son la principal causa de demanda de energía. Sobre todo, existe un gasto innecesario de la misma que al fin y al cabo aumenta significativamente la demanda.

Aprovechar fuentes de energías naturales, es la opción más viable que se está llevando a cabo en la mayoría de los países desarrollados, debido a que son amigables con el ambiente y prácticamente inagotables, su costo de instalación y mantenimiento son otro punto a favor que tienen este tipo de energías.

En sectores rurales de difícil acceso y alejados de la ciudad como la comunidad La Chimba en el Cantón Cayambe es donde se debe aplicar proyectos innovadores, para solucionar los problemas de cortes eléctricos y que el servicio de electricidad llegue a más habitantes del sector.

Con la aplicación de nuevas tecnologías como es el Aerogenerador, los habitantes del lugar se verán beneficiados, viendo mejorar su estilo de vida, y de una u otra forma colaborando con el crecimiento económico del sector.

Para conocer si el proyecto es factible se realiza primero un estudio del lugar donde se va a implantar el aerogenerador, el cual conlleva tomar mediciones atmosféricas por medio del anemómetro, seguido por la tabulación de datos, cálculo de velocidades y otros factores que influyen en la investigación.

Objetivos

Objetivo General

Estudiar la factibilidad para la implementación de un aerogenerador para la generación de energía eléctrica en la zona de Cayambe.

Objetivos Específicos

- Conocer teóricamente los beneficios de usar la energía del viento y su proceso de instalación.
- Investigar las variables meteorológicas para el correcto funcionamiento de un aerogenerador.
- Concienciar en las personas la aplicación de energía eólica, indicando sus principales ventajas económicas, sociales y ambientales.
- Determinar la factibilidad de implementar un aerogenerador en esta zona.

1. Capítulo I: Marco teórico

1.1. Energía Renovable

Las energías renovables son aquellas que provienen de recursos naturales que son hipotéticamente interminables y pueden regenerarse. Estas provienen de forma directa o indirecta de la energía del sol (Schallenberg , y otros, 2008, pág. 46). Existen varias fuentes de energía que se regeneran de forma natural y cuyas energías relacionadas son:

Tabla 1. Energías renovables limpias

Fuente de energía	Procedencia
Solar (Térmica)	Calor del sol que llega a la Tierra.
Solar (luminosa)	Luz del sol que llega a la Tierra.
Eólica	Fuerza del viento.
Hidráulica	Agua de los ríos y corrientes de agua dulce.
Mareomotriz	Mares y Océanos.
Geotérmica	Calor del interior de la tierra.
Undimotriz	Olas del mar y de los océanos.

Nota: Las energías renovables limpias se clasifican de la siguiente manera,
Fuente: (Roldán Viloria, 2012, pág. 46)

La mejor forma de aprovechar las energías renovables es la producción de electricidad. Y debido al encarecimiento y falta de recursos energéticos fósiles, hoy en día, es la mejor alternativa y la más viable.

A nivel mundial, el uso de energías renovables ronda en el 23,7%, pero crece aceleradamente gracias a que el tema ambiental ha logrado despertar conciencia en la mayoría de países, los cuales buscan desarrollar y aplicar energías limpias, no contaminantes al medio ambiente, que sean rentables y accesibles.

Hoy en día se puede observar a diferentes personas promoviendo el uso de energías limpias, debido a que más de ser un negocio rentable tanto en el presente como pensando en el futuro, se estaría ayudando a cuidar el planeta.

1.1.1. Importancia de la energía renovable

Las energías renovables es una solución a un problema mundial ya que las energías renovables son una fuente natural que se pueden reponer en un corto período de tiempo (Roldán Vilorio, 2012, pág. 48).

Las energías renovables, además, de ser una de las mejores opciones que existen hoy en día, es la mejor elección ya que son ilimitadas y la mayoría de ellas no contamina el medio ambiente debido a que son energías limpias.

Las fuentes de energía renovable son gratis debido a que se puede encontrar alrededor la luz de sol, el viento, el caudal de un río. Al aprovechar este tipo de fuentes naturales, deja de ser dependientes de fuentes no renovables, que a la larga provocan un gran daño en el medio ambiente.

1.2. El Viento

El viento se produce cuando existe una diferencia de temperatura entre el aire de una región y el aire de otra. Debido a su menor densidad, la masa de aire más caliente se

eleva, dejando un espacio que es ocupado por la masa de aire frío (Vasquez, 2005, pág. 32).

El viento se encuentra distribuido en la atmósfera alrededor de la tierra, por tal razón es posible aprovechar de este recurso, ya que se estaría aportando al cuidado del medio ambiente.

1.3. Energía eólica

La energía eólica utiliza la fuerza del viento para producir electricidad y se usa como fuerza motriz (Ballard, 2003, pág. 93).

Si se habla de crecimiento en los últimos años de energías renovables, la energía eólica es la que tiene mayor aumento y acogida a nivel mundial. Esta es utilizada en gran porcentaje para la generación eléctrica de varios países, y se puede observar su incremento en los últimos 10 años.

Los factores que incidieron para que las energías renovables (energía eólica) tuvieran aumento en la última década son:

- Fuentes de viento inagotables existentes en todo el planeta.
- Continuo agotamiento de combustibles fósiles.
- Avances tecnológicos.
- Facilidad de aceptación de proyectos que ayuden al cuidado del medio ambiente por parte de los gobiernos de los diferentes países.

1.3.1. Aplicación de la Energía Eólica

La energía eólica proviene de la fuerza del viento, entre las aplicaciones más importantes en la antigüedad resaltan las siguientes: (Roldán Vilorio, 2012, pág. 128).

- Navegación marítima.
- Molinos de viento para la molienda de granos.
- Molinos de viento para la extracción de agua.
- Molinos eólicos para producir electricidad.

En la actualidad, la principal aplicación de la energía eólica es la generación de electricidad. La energía contenida en la fuerza de viento es transformada a energía mecánica por medio de una máquina llamada aerogenerador o turbina de viento.

1.3.2. Ventajas

La generación eólica consiste en el aprovechamiento de la energía o fuerza del viento para generar una corriente eléctrica. Este tipo de aprovechamiento tiene las siguientes ventajas: (Roldán Vilorio, 2012).

- La energía base a utilizar es el viento por tal motivo es gratuita y renovable.
- El proceso de generación de energía no produce contaminación ambiental ni efecto invernadero.
- La instalación de un parque eólico es muy rápida de montar (6 meses a 1 año).
- Aumenta la tasa de empleo de la población.
- Aumenta la plusvalía en el sector beneficiado.

- El costo de inversión es relativamente alto, pero se equilibra con su bajo costo de operación y esto resulta una opción atractiva para los inversionistas.
- Ahorra otras materias primas no renovables.
- Se promueve la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías.

1.3.3. Inconvenientes

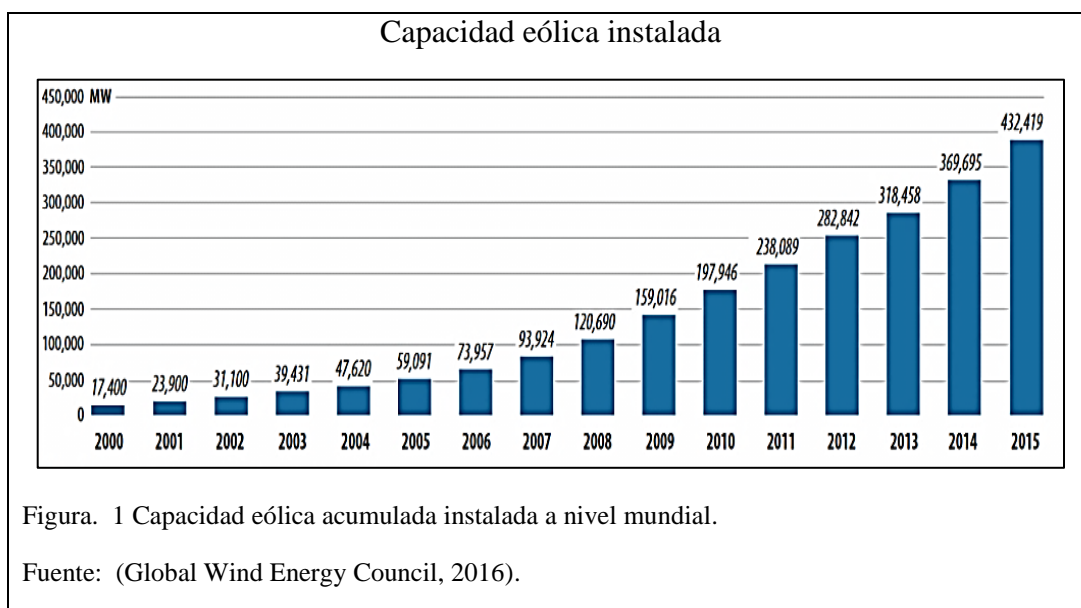
La producción de energía eólica presenta algunos inconvenientes debido a varios factores que pueden influir en el desarrollo de esta: (Roldán Vilorio, 2012).

- Su producción de electricidad no es continua. Está sujeta a si hay o no viento.
- Se trata de una energía muy subvencionada.
- Los parques eólicos tienen un ligero impacto ambiental (fauna y paisaje).
- Para el acceso a los parques se necesitan abrir carreteras, que en algunos casos causan un impacto ambiental.
- Genera ruido que puede ser molesto, si hay viviendas próximas en la zona.
- Puede ser causa de la muerte de aves, especialmente de paso, ya que los parques se instalan en zonas con corrientes de aire que son las que aprovechan las aves migratorias.

1.3.4. La energía eólica a nivel mundial

La energía eólica durante los últimos 15 años ha crecido notoriamente dentro de los mercados de generación de energía a nivel mundial. Para comprobar la relevancia

que tiene este tipo de generación de energía. En la figura 1, podemos observar el crecimiento de la capacidad instalada acumulada de energía eólica en el mundo.



Como se observa en la Figura, la capacidad instalada en el año 2000 es de 17,400 MW y su valor máximo alcanzado en el 2015 es de 432,419 MW. Esto nos demuestra que en el 2015 la generación de energía eólica es 25 veces mayor a la del año 2000.

A continuación, se indica el aporte regional, por continentes, a la industria eólica en el año 2015 (Global Wind Energy Council, 2016).

- África aporta el 0,76 % de energía eólica a nivel mundial, siendo Sudáfrica con 1,053 MW el país líder, en este continente, en el 2015.
- Asia aporta el 40.6 % de energía eólica a nivel mundial, siendo China con 145,104 MW el país líder, en este continente, en el 2015.
- Europa aporta el 34,17% de energía eólica a nivel mundial, siendo Alemania con 44,947 MW el país líder, en este continente, en el 2015.

- Latinoamérica y El Caribe aportan el 2,84 % de energía eólica a nivel mundial, siendo Brasil con 8,715 MW el país líder, en este continente, en el 2015.
- Norteamérica aporta el 20,5 % de energía eólica a nivel mundial, siendo Estados Unidos, el país líder, en este continente, en el 2015.
- Región del Pacífico aporta el 1,12 % de energía eólica a nivel mundial, siendo Australia con 4,187 MW el país líder, en este continente, en el 2015.

En la Figura 2 se puede apreciar los diez países con mayor generación de energía eólica al cierre del año 2015.

Generación de energía eólica

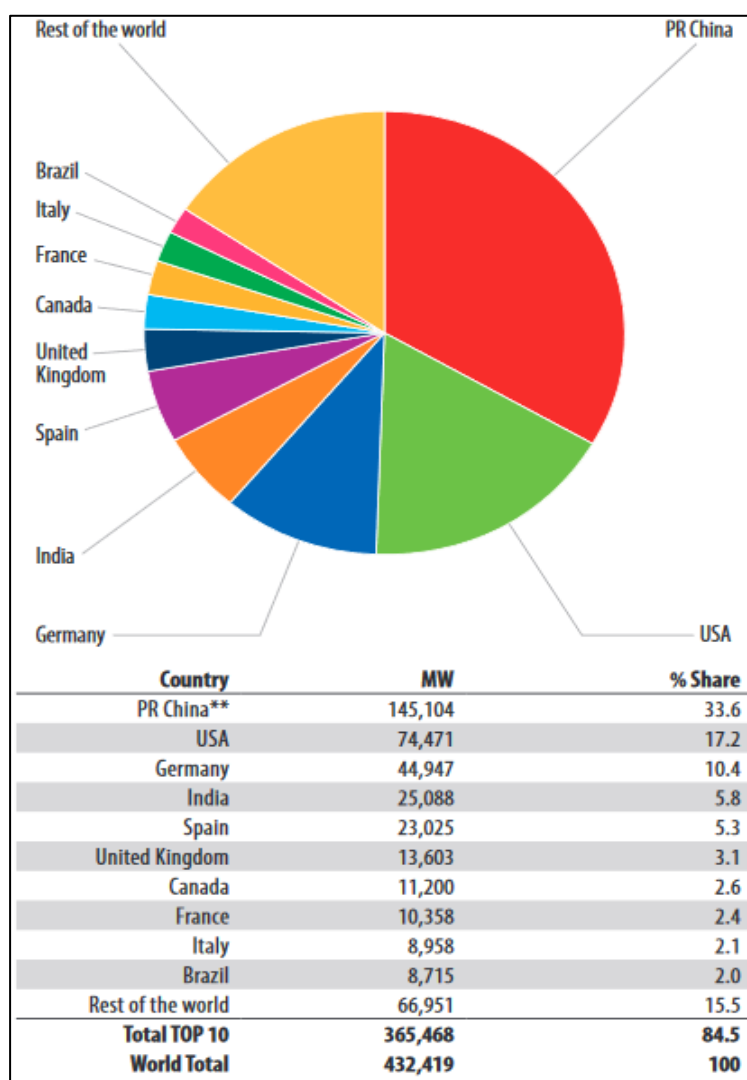


Figura. 2 Países con mayor generación de energía eólica en el 2015

Fuente (Global Wind Energy Council, 2016).

Se puede apreciar claramente que China es el país con mayor capacidad de generación de energía eólica en el mundo, aportando con el 33, 6 %.

1.4. Aerogeneradores

Los aerogeneradores son máquinas que transforman la energía contenida en la fuerza del viento, en energía mecánica rotativa (palas y multiplicador mecánico), y esta a su vez en energía eléctrica por medio de un generador eléctrico (Roldán Vilorio, 2012, pág. 128).

1.4.1. Tipos de aerogeneradores

En la actualidad, existen una gran variedad en cuanto a los tipos de aerogeneradores, los cuales se pueden clasificar en función a la posición de su eje, respecto a la posición en la que recibe el viento y de acuerdo al número de palas. (Roldán Vilorio, 2012, pág. 129)

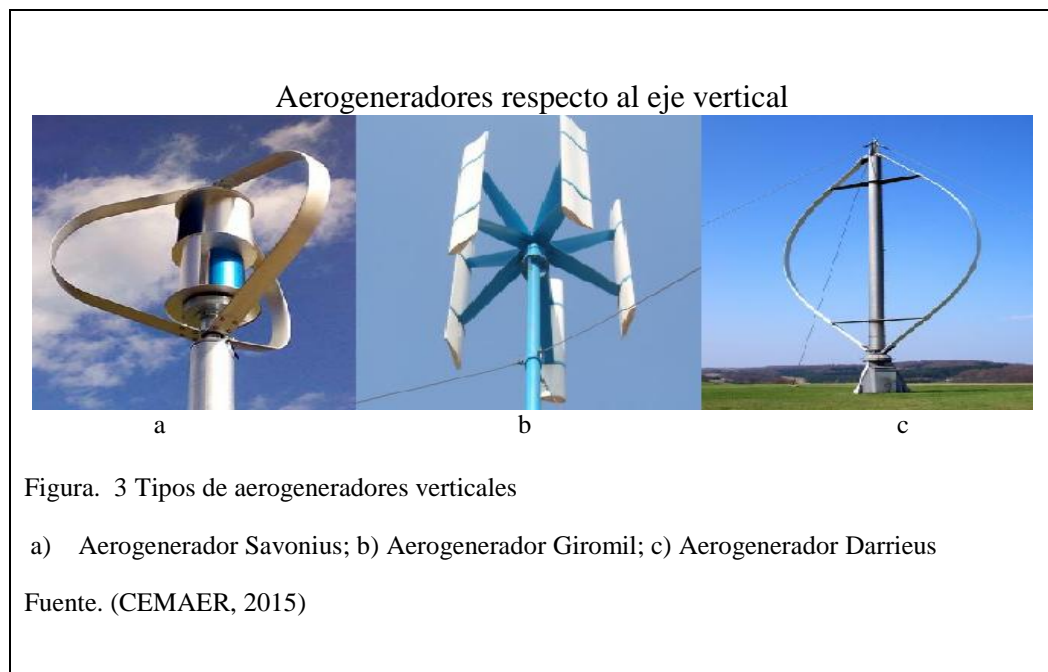
1.4.1.1. Respecto a la posición de su eje

a) De eje horizontal: Su eje de rotación es paralelo a la dirección del viento. Este tipo de aerogenerador es el más común, usado para la producción de electricidad. También se denominan HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) (Villarrubia López, 2013, pág. 132).

b) De eje vertical: Su eje de rotación es perpendicular a la dirección del viento. También se denominan VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) (Villarrubia López, 2013, pág. 132).

Existen 3 tipos de aerogeneradores de eje vertical como son:

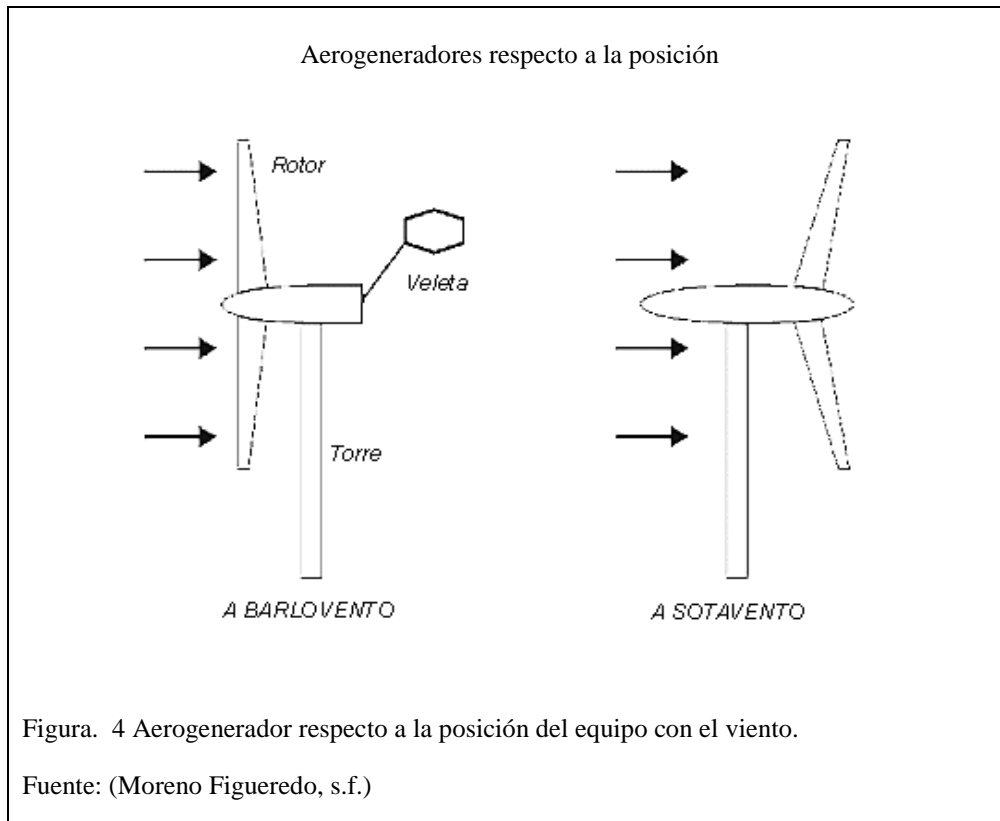
- **Savonius:** Se caracteriza por estar formado por dos semicírculos desplazados horizontalmente a una determinada distancia, a través de la cual se desplaza el aire, por lo que desarrolla poca potencia.
- **Giromil:** Este se destaca por tener un conjunto de palas verticales unidas con dos barras en el eje vertical y ofrece un rango de suministro de 10 a 20 kW.
- **Darrieus:** Está formado por dos o tres palas biconvexas unidas al eje vertical por la parte inferior y superior, permite aprovechar el viento dentro de una banda ancha de velocidades. El inconveniente con este tipo de herramienta es que no se enciende por sí solo y necesita un rotor Savonius (Ramírez, 2015).



1.4.1.2. Respecto a la posición del equipo con referencia al viento

a) A barlovento: Cuando el rotor recibe el aire de frente. Es el caso de la mayoría de los generadores instalados en los parques eólicos. Este aerogenerador necesita de un dispositivo orientador para encararse al viento.

b) A sotavento: En este caso el viento ataca por el lado de la góndola que tiene un diseño especial. El aerogenerador no necesita mecanismo de orientación ya que el aire lo posiciona de la forma correcta. La construcción de las palas es especial para este caso. Tienen las pérdidas que suponen la góndola y el soporte (Roldán Vilorio, 2012, pág. 129).



1.4.1.3. Respecto al número de palas

a) Una pala (Monopala): Estos aerogeneradores requieren de una mayor velocidad de giro para producir la misma energía de salida. Esto tiene su inconveniente puesto que introducen en el eje esfuerzos muy variables que acortan la vida de la instalación.

b) Dos palas (Bipala): Los diseños de las bipalas tienen la ventaja de ahorro en cuanto a costo y peso se refiere, pero por otra parte al igual que los monopalas

necesitan de una velocidad de giro más alta. Estos requieren un diseño más complejo, con un rotor basculante, que tiene que ser capaz de inclinarse para evitar fuertes sacudidas en la turbina, cada vez que una de las palas pasa por la torre (ECOVIVE, 2010).

c) De tres palas (Tripala): La mayoría de los aerogeneradores modernos son de tripala, con el rotor a barlovento, usando motores eléctricos para su orientación, a este diseño se lo llama el clásico concepto danés. El motivo por ser el más utilizado es por la fricción con el aire: con tres palas rinden un 4% más que con dos palas (ECOVIVE, 2010).

d) Más de tres palas (multipalas): Los multipala todavía conservan similitud con los antiguos molinos multipala que se usaban para bombear agua de los pozos. Estos aerogeneradores ofrecen aplicaciones residenciales muy buenas ya que se utilizan, especialmente, para lugares con vientos sin mucha fuerza, y es, además, virtualmente silenciosa (ECOVIVE, 2010).

Aerogenerador por el número de palas

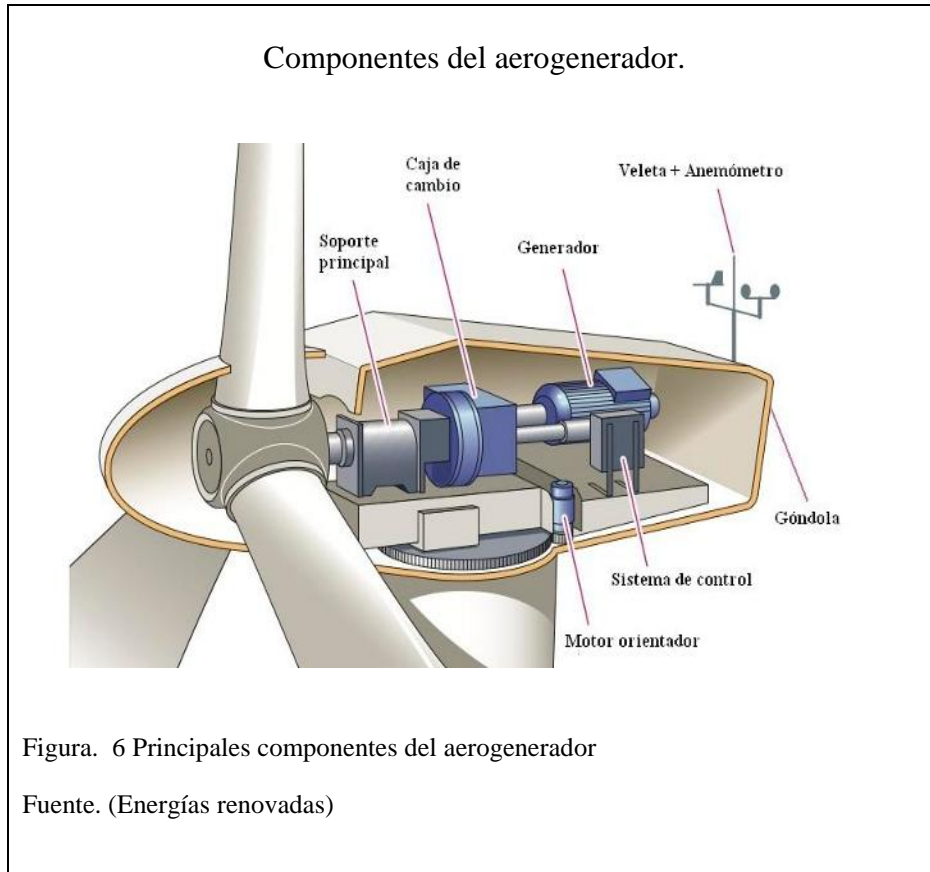


Figura. 5 Aerogenerador Multipalas

Fuente: (ECOVIVE, 2010)

1.4.2. Partes principales de un aerogenerador

Las partes principales de un aerogenerador son la hélice o rotor, la turbina o caja de engranes, el generador, la torre y el sistema de control.



1.4.2.1. La hélice o rotor

El rotor está conformado por palas con formas especiales, con superficies aerodinámicas. Están hechos, normalmente, de compuestos de fibra de vidrio, plástico reforzado o madera.

La cantidad de energía que una turbina eólica producirá está determinada, sobre todo, por el diámetro de este rotor. El área del rotor define su área de barrido, o la cantidad de viento interceptado por la turbina eólica. Las palas son giratorias para conseguir un cierto ángulo de ataque con respecto al viento (Briconatur, 2012).

1.4.2.2. Góndola

La góndola es la que protege a la caja multiplicadora, generador y demás componentes. Esta se encarga de soportar toda la maquinaria y está, a la vez, debe ser capaz de girar para seguir la dirección del viento, por lo que se une a la torre por medio de rodamientos (Moreno Figueredo, s.f.).

1.4.2.3. Turbina o caja de engranes

La turbina recibe la energía procedente del rotor y esta la transmite al generador. Muchas turbinas, principalmente, aquellas que generan sobre los 10KW, usan una caja multiplicadora de velocidad de giro para adaptar la velocidad adecuada para el generador (Briconatur, 2012).

1.4.2.4. Generador

El generador convierte la energía mecánica producida por el rotor en energía eléctrica. Existen tres tipos de generadores:

1. **Asíncrono:** También conocido como jaula de ardilla. Es de una sencilla fabricación, de menor versatilidad, necesita una sincronización suave, no regula el factor de potencia y necesita etapas de condensadores.
2. **Asíncronos con rotor bobinado:** Permite inyectar y extraer energía del rotor. Al inyectar diferentes frecuencias al rotor se consigue poder generar a velocidades muy diferentes de la de sincronismo, y al permitir la extracción de energía del rotor se consigue generar hasta un 10% de la energía producida.

3. **Síncrono (múltiplo):** Tiene un control más optimizado, no usa multiplicadora, tiene bajo deslizamiento y permite una reducción de la tensión (OPEXenergy, s.f.).

1.4.2.5. Torre

La torre es la encargada de sostener a todos los componentes ya mencionados anteriormente. Se suelen construir de acero o de hormigón y deben ser robustas y resistentes.

Cuanta más alta sea la torre más posibilidades tenemos de conseguir vientos más fuertes y con menos turbulencias del viento inferior.

También se debe evitar la posible resonancia entre las gamas de frecuencias de las aspas y la torre (Esteire, Madrid, & Madrid, 2010, pág. 104).

1.4.2.6. Sistema de control y protección

El sistema de control abarca desde interruptores, fusibles y reguladores de la carga de baterías hasta sistemas computarizados de control de sistemas de orientación. Los sistemas de control y protección varían dependiendo de la aplicación de la turbina eólica y de los sistemas de energía que vaya a soportar (Briconatur, 2012).

Estos sistemas de control constituyen el cerebro mismo del aerogenerador, ya que se autocontrola de acuerdo con los parámetros que se fijan. El sistema de control, así como los motores de posicionamiento tienen su alimentación independiente de la que pueda generar el alternador (Roldán Vilorio, 2012, pág. 134).

1.4.3. Equipo de medición de viento

Para la medición del potencial eólico se requieren de aparatos que midan la velocidad del fluido y que sean capaces de proporcionar datos, horarios; es decir que proporcione el recorrido del viento en una hora, sean capaces de proporcionar las velocidades instantáneas y acumuladas en períodos de tiempo.

El instrumento que mide la velocidad del viento, de manera directa en aplicaciones eólicas, es normalmente el anemómetro (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 3013).

1.4.4. Anemómetro

El anemómetro (del griego *anemos*, viento) están destinados para medir la velocidad del viento.

Existen distintos tipos de anemómetros según su principio de operación:

- Medición por medios mecánicos: de rotación o de rueda alada.
- Mediante el enfriamiento de un hilo caliente.
- Medición por diferencia de presión: anemómetros de tubo de Pitot.
- Medición por ultrasonido, láser, o efecto Doppler (SODAR)

Comúnmente los más utilizados son los de rotación. Estos pueden ser de tipo cazoleta o de tipo hélice.

1.4.4.1. Anemómetro de cazoletas

Los anemómetros de cazoletas tienen tres o cuatro cazoletas cónicas o semiesféricas distribuidas simétricamente alrededor de un eje vertical. Giran a su alrededor, dado

que la fuerza que ejerce el viento es mayor en la cara cóncava que en la convexa. La velocidad de giro es proporcional a la velocidad del viento.

Su ventaja radica en que se mide la componente horizontal del viento. El anemómetro de tres cazoletas es el más utilizado (Villarrubia López, 2013, pág. 47).



Figura. 7 Anemómetro de cazoletas

Fuente: (PCE, s.f.)

1.4.4.2. Anemómetro digital tipo hélice

El anemómetro tipo hélice se utiliza cuando se requiere determinar la velocidad en una dirección particular. Comúnmente se los utiliza asociados a una veleta que los orienta en la dirección de donde sopla el viento.

Estos anemómetros presentan una respuesta más rápida que los de cazoletas, pero por otra parte las vibraciones de la veleta pueden afectar a la medición (Villarrubia López, 2013, págs. 46-47).

Anemómetro digital comercial.



Figura. 8 Anemómetro tipo hélice

Fuente: (KestrelMeters, 2015)

1.5. Colocación de los instrumentos de medida

La colocación de los sensores (anemómetro y veleta) debe ser en lugares despejados, libre de perturbaciones provocadas por obstáculos próximos, ya que estos perturban notablemente la velocidad y dirección del viento.

Las estaciones fijas se colocan a una altura estándar de 10 metros sobre el nivel del suelo, a fin de evitar las perturbaciones del mismo sobre el viento. Para evitar los efectos de apantallamiento de la torre del mástil conviene usar un poste cilíndrico delgado, tensados por cables. Además, en estaciones móviles o semipermanentes se aceptan alturas de 2 a 3 metros (Villarrubia, 2004, pág. 50).

Circulación del viento

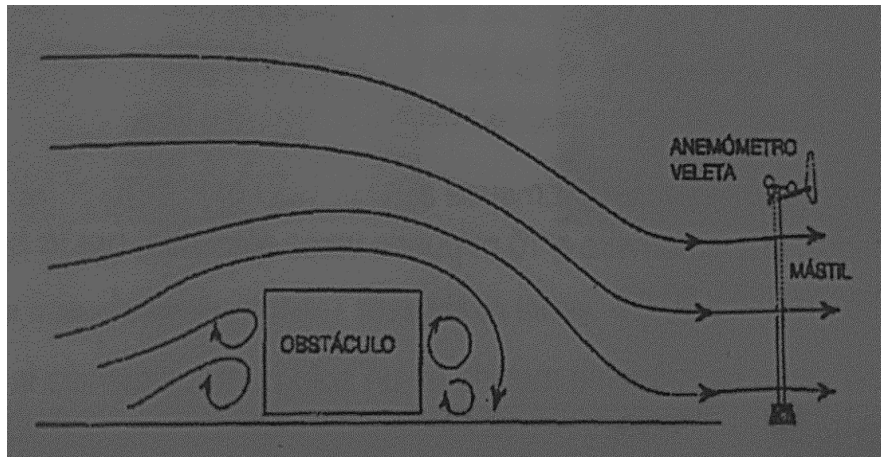


Figura. 9 Influencia de un obstáculo en la circulación de viento.

Fuente: (Villarrubia López, 2013, pág. 49)

En general, un obstáculo de altura h , perturba el flujo de aire a una distancia $2h$ a barlovento y de $10h$ a $20h$ a sotavento. En la dirección vertical de perturbación puede alcanzar hasta una altura $2h$, como se puede ver en la figura.

Influencia de un obstáculo

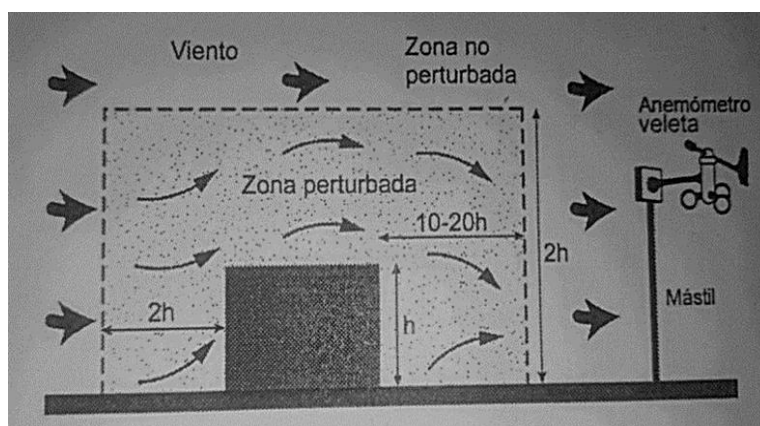


Figura. 10 Volumen de influencia de un obstáculo

Fuente: (Villarrubia López, 2013)

2. Capítulo II: Evaluación del recurso eólico disponible

2.1. Localización

Este trabajo de investigación se realiza en la comunidad La Chimba perteneciente a la Parroquia Olmedo, Cantón Cayambe - Provincia de Pichincha.

La comunidad La Chimba se encuentra al Este del Cantón Cayambe a 3.100 msnm, con una población estimada de 400 familias con 3 y 4 integrantes por familia. Esta información de la población está basada en los registros de censo de comuneros de la comunidad.

Mapa de localizacion

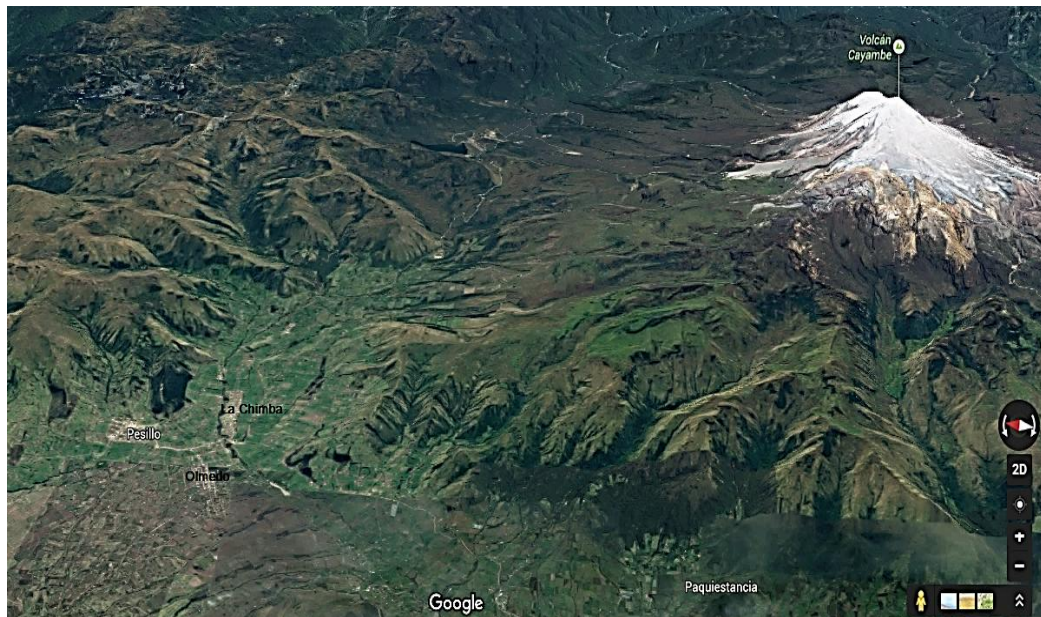


Figura. 11 Mapa satelital de la comunidad La Chimba

Fuente: (GOOGLE, 2016)

El estudio preliminar para la implementación de un aerogenerador es de vital importancia para conocer la disponibilidad del recurso renovable que existe en el lugar; el primer paso es determinar la cantidad existente de viento en esta zona.

Para realizar una investigación hay que tomar en cuenta que el viento o aire en movimiento tiene cambios debido a las condiciones físicas, geográficas del sitio de estudio.

Entre estos factores físicos se anotan:

- La posición geográfica del lugar.
- Altura geográfica del sitio.
- Orografía del lugar.
- Período u hora del día.
- Estación o época del año.
- Estado ecológico del lugar.

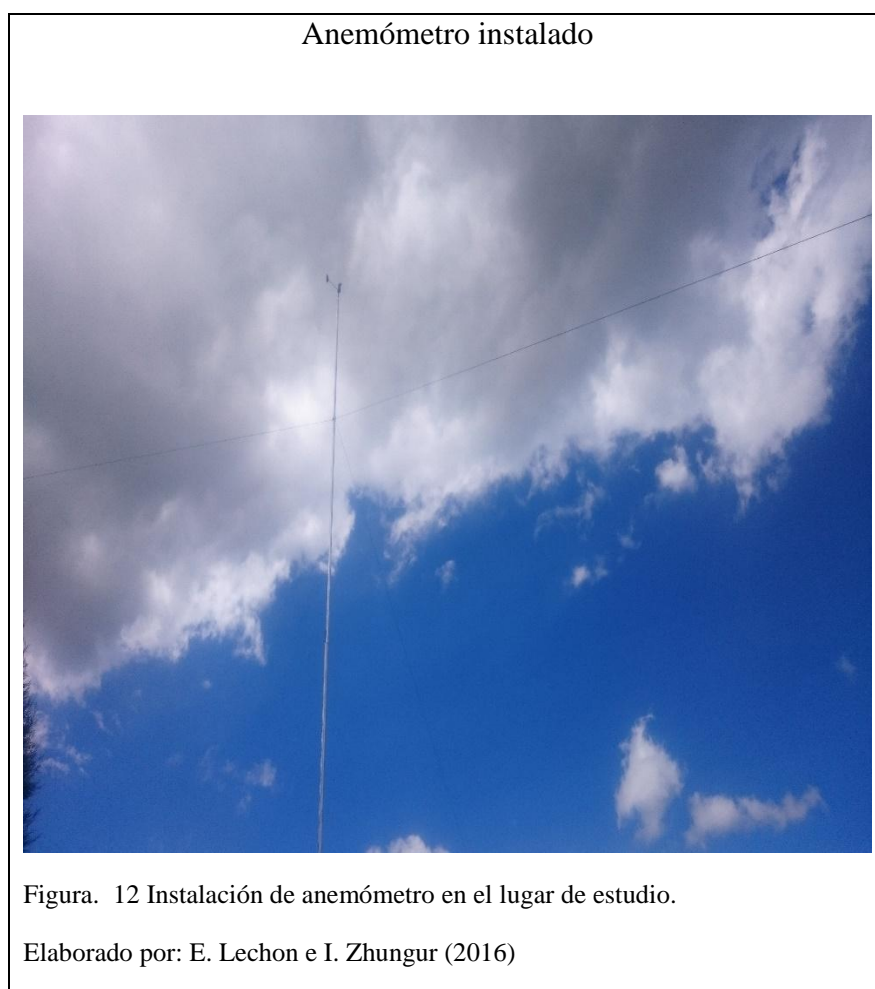
Estos factores están relacionados directamente con el recurso que es el sol; es decir que en el lugar que se realiza el estudio eólico existe una considerable radiación, ya que el viento se origina por la diferencia de densidad del aire efecto del desigual calentamiento atmosférico producido por el sol (GUAIRICAJA USCA, 2013, págs. 11-12).

La Chimba está ubicada en la región sierra del Ecuador y cuenta con una intensidad de radiación solar considerable y además geográficamente es una zona que cuenta con planicies, laderas, montañas que brindan una geometría espacial para el aprovechamiento energético del viento.

2.2. Instalación de Anemómetro y toma de medidas

Para realizar la instalación del anemómetro se toma en cuenta los aspectos ya mencionados en apartados anteriores sobre la colocación de los instrumentos de medida:

El anemómetro se lo colocó en un mástil de tubo galvanizado y tiene un largo de 10 m sujetado con tres tensores para que se mantenga fijo y no dé problemas al momento de las mediciones.



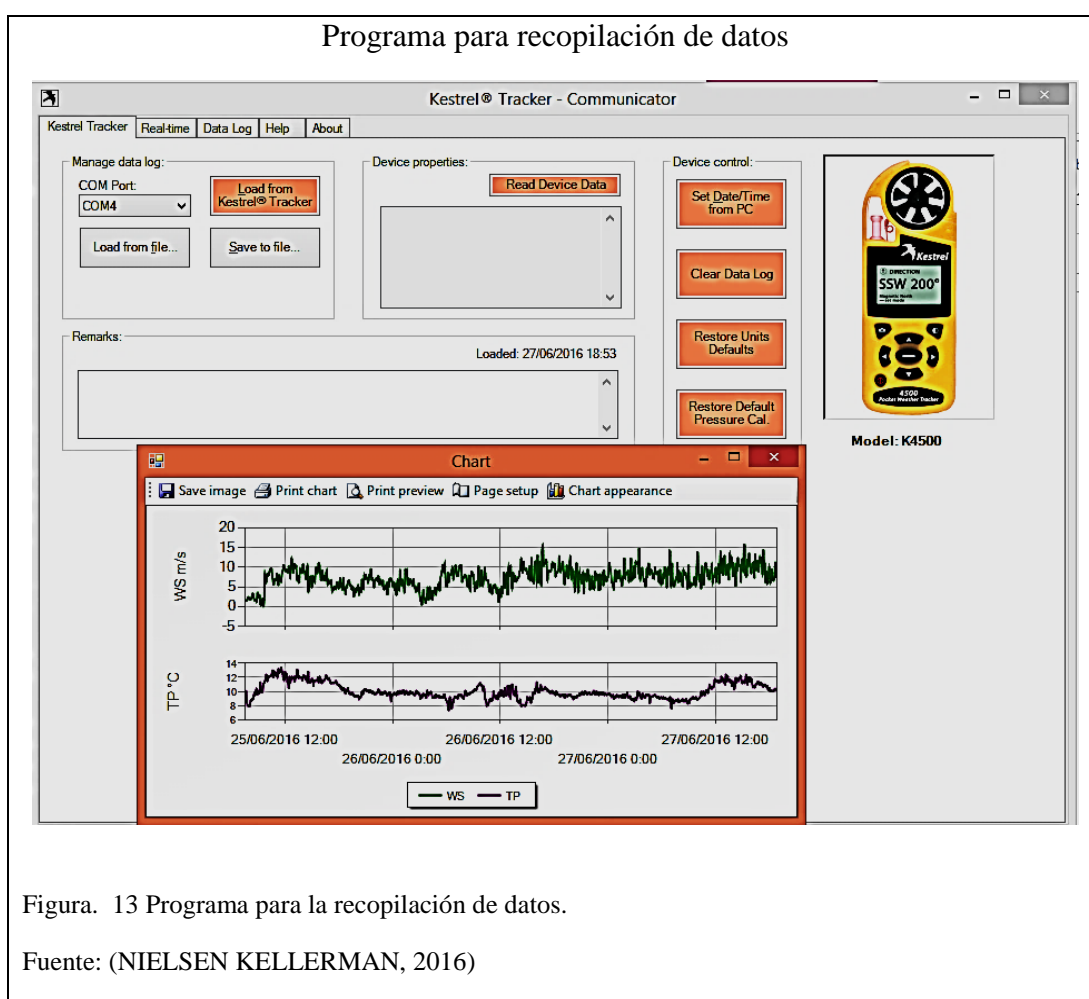
El anemómetro que se utilizó es digital de la serie Kestrel 4500 VN, prácticamente es una mini estación meteorológica muy completa ya que proporciona datos como son

la velocidad de viento, dirección, presión barométrica, altitud, temperatura, humedad relativa, etc.

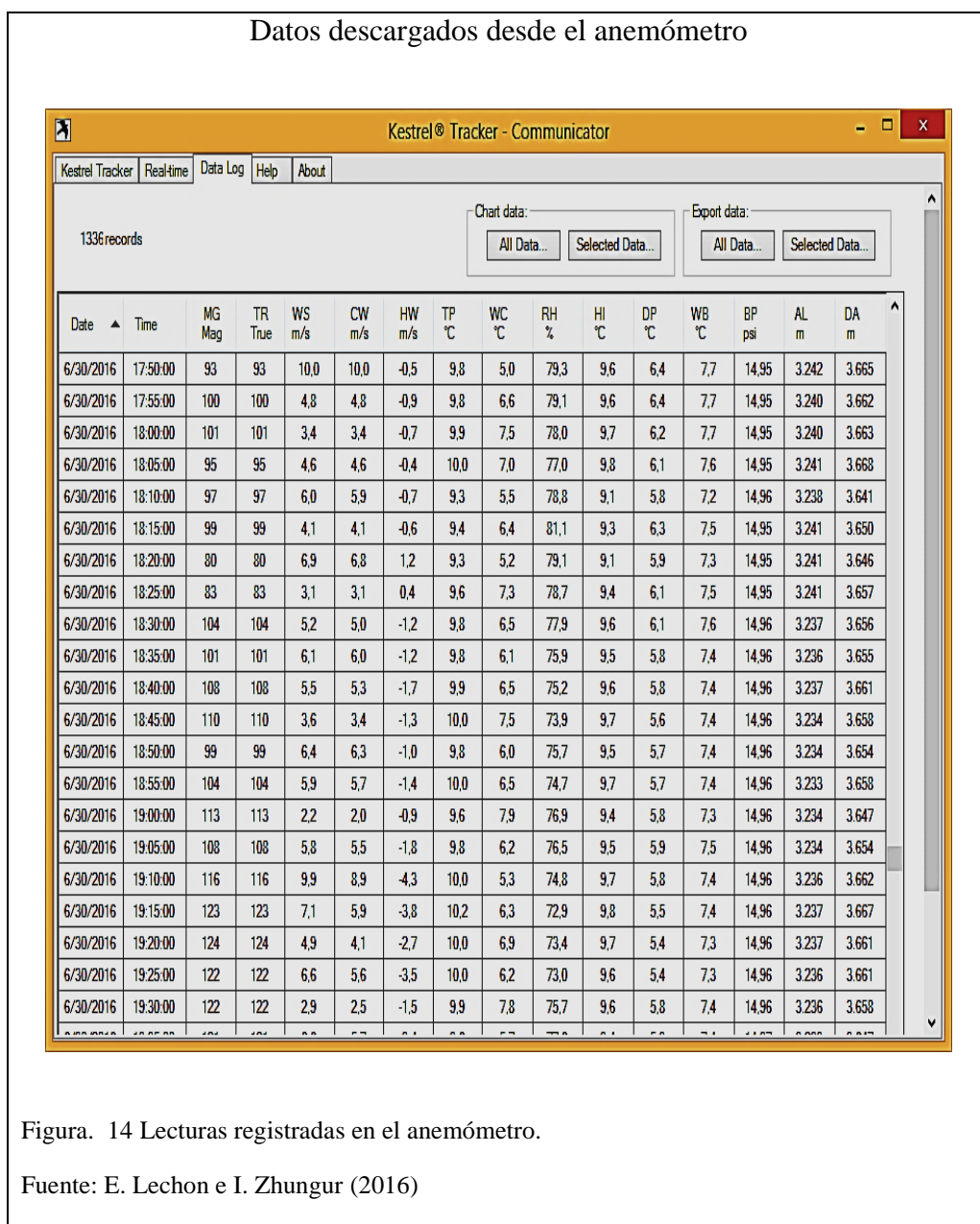
El anemómetro Kestrel 4500 VN, graba datos de manera automática de acuerdo como este sea programado, para el estudio del proyecto el almacenamiento de datos se realiza cada 5 min.

2.2.1. Recopilación de datos

El programa Kestrel® Tracker – Communicator es el recomendado por el fabricante del anemómetro, mismo que es de libre acceso en la web. El programa facilita la realización de gráficos a partir de los datos recopilados desde el anemómetro.



También permite pasar los datos a otro programa como es el Excel para la realización de cálculos y gráficos de acuerdo a las necesidades que se presenten.



2.3. Cálculo de los datos Eólicos

Una vez obtenidos los datos registrados por el anemómetro, estos se organizan mediante tablas y gráficos para tener una idea clara del potencial de viento que existe en el lugar.

(Enríquez Harper, 2012) Afirma: “Cuando se trata de evaluar en un sitio las condiciones generales del viento se debe considerar datos de 10 minutos a 1 hora de promedio” (pág. 80).

Para el estudio se realiza la medición de un total de 279 horas en el mes de Junio, cada 5 min y todos los datos recopilados se los promedia en 1 hora como se muestra en el Anexo 1.

Los datos de velocidad promedio horaria se clasifican por secciones; es decir, se divide todo el rango de variación de la velocidad de viento en secciones de 1 m/s, quedando la distribución de frecuencias de viento que se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Distribución de frecuencias del lugar de estudio.

Datos del mes de Junio		
Intervalo de velocidades	Centro de velocidades	Frecuencia
	Vi	Ni
m/s	m/s	Horas
$0 \leq v \leq 1$	0,5	2
$1 < v \leq 2$	1,5	11
$2 < v \leq 3$	2,5	15
$3 < v \leq 4$	3,5	18
$4 < v \leq 5$	4,5	27
$5 < v \leq 6$	5,5	37
$6 < v \leq 7$	6,5	55
$7 < v \leq 8$	7,5	47
$8 < v \leq 9$	8,5	34
$9 < v \leq 10$	9,5	21
$10 < v \leq 11$	10,5	7
$11 < v \leq 12$	11,5	5
	TOTAL	279

Nota: En el cuadro se puede observar como los datos están clasificados de acuerdo con un intervalo de velocidades y la frecuencia por 1 hora promedio, Elaborado por: E. Lechón e I. Zhungur.

Frecuencias de velocidades de Viento del mes de Junio

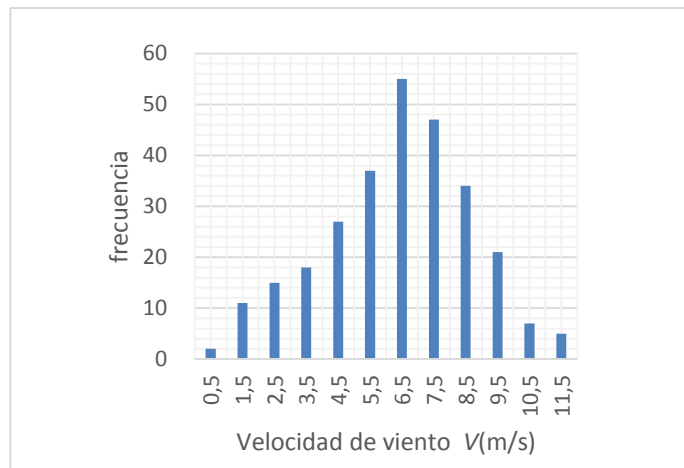


Figura. 15 Frecuencias de la velocidad de Viento.
Elaborado por: Edwin Lechón e Israel Zhungur

2.3.1. Distribución de Weibull

En la mayoría de los casos de interés energético, la distribución de probabilidad de viento, sigue aproximadamente la función densidad de probabilidad de Weibull. La función densidad de probabilidad $p(v)$ correspondiente a la ley de Weibull es del tipo de dos parámetros (k, c) y está dada por la expresión:

Ecuación 1. Función densidad de probabilidad

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

En donde:

- v es la velocidad del viento (m/s).
- $p(v)$ es la función densidad de probabilidad de Weibull.
- c es el factor de escala (m/s), valor próximo a la velocidad media anual.

También se acostumbra a designar por A .

- k es el factor de forma que caracteriza la asimetría o sesgo de la función $p(v)$ (Villarrubia López, 2013, pág. 66).

2.3.1.1. Propiedades de la función de Weibull

A continuación, se presentan algunas de las propiedades de la función de Weibull que nos ayudaran en los posteriores cálculos:

- a) La densidad de probabilidad tiene un máximo o moda para la velocidad v_m dada por:

Ecuación 2. Relación Velocidad media y factor de escala

$$\frac{v_m}{c} = \left(\frac{k-1}{k} \right)^{1/k}$$

- b) La probabilidad que la velocidad de viento sea menor o igual que un cierto valor de V, viene dada por la distribución acumulada F, definida por:

Ecuación 3. Frecuencia acumulada de las velocidades > 0 = que un valor de V.

$$F(v \leq V) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

- c) La distribución acumulada complementaria F' permite calcular la frecuencia acumulada de las velocidades que son mayores o iguales que un valor de V:

Ecuación 4. Frecuencia acumulada para velocidades < 0 = que un valor de V

$$F'(v \geq V) = e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

2.3.1.2. Parámetros estadísticos de la distribución de Weibull

La velocidad media anual $\langle v \rangle$, la mediana \tilde{v} y la varianza σ^2 , para una distribución de Weibull se calculan según:

Ecuación 5. Velocidad media anual (a), La mediana (b), La varianza(c).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{a) } \langle v \rangle = c \Gamma \left(1 - \frac{1}{k} \right) \\ \text{b) } \tilde{v} = c (\ln 2)^{1/k} \\ \text{c) } \frac{\sigma^2}{c^2} = \Gamma \left(1 - \frac{1}{k} \right) - \left[\Gamma \left(1 - \frac{1}{k} \right) \right]^2 \end{array} \right.$$

En donde $\Gamma(x)$ es la función gamma, en el Anexo 2 se incluyen los valores de esta función.

2.3.1.3. Parámetros de interés para cálculos energéticos

Un parámetro importante es la media anual del cubo de las velocidades $\langle v^3 \rangle$, que no se debe confundir con el cubo de la velocidad media anual $\langle v \rangle^3$, para la distribución de Weibull viene dada por:

Ecuación 6. Valor medio del cubo de las velocidades del viento.

$$\langle v^3 \rangle = c^3 \Gamma\left(1 - \frac{3}{k}\right)$$

La velocidad eficaz v^* se define como aquella velocidad que elevada al cubo coincide con la media anual de los cubos de las velocidades.

Ecuación 7. Velocidad eficaz

$$v^* = \langle v^3 \rangle^{1/3}$$

A partir de las expresiones anteriores se obtienen el siguiente conjunto de relaciones:

Ecuación 8. Velocidad media anual/parámetro c:

$$\frac{\langle v \rangle}{c} = \Gamma\left(1 - \frac{1}{k}\right)$$

Ecuación 9. Desviación estándar/velocidad media anual:

$$\frac{\sigma}{\langle v \rangle} = \left[\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 10. Factor de energía o factor de potencia eólica (F_e):

$$F_e = \frac{\langle v^3 \rangle}{\langle v \rangle^3} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

(Villarrubia López, 2013, págs. 68-71).

2.3.1.4. Cálculo de los parámetros de Weibull

Los parámetros de Weibull (c y k) se determinan a partir de un ajuste por mínimos cuadrados a través de la distribución acumulada $F(v)$:

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Aplicando dos veces el logaritmo neperiano a la expresión anterior, se tiene:

$$\ln(1 - F(v)) = -\left(\frac{v}{c}\right)^k \rightarrow \ln[-\ln(1 - F(v))] = k \ln v - k \ln c$$

Se procede al ajuste por mínimos cuadrados a la recta: $y = kx + B$, en donde:

Ecuación 11. Ajuste por mínimos cuadrados

$$y = \ln[-\ln(1 - F)] ; \quad x = \ln v \quad ; \quad B = -k \ln c$$

Calculada la recta por mínimos cuadrados, su pendiente proporciona el valor de k y el valor de c se lo obtiene a partir de la expresión:

Ecuación 12. Factor de escala

$$c = e^{-\left(\frac{B}{k}\right)}$$

Las expresiones usadas para calcular los coeficientes de la recta de regresión lineal son:

Ecuación 13. Valor Coeficiente A de la recta

$$A = \frac{\sum f_i x_i y_i - (\sum f_i x_i)(\sum f_i y_i)}{\sum f_i x_i^2 - (\sum f_i x_i)^2}$$

Ecuación 14. Valor Coeficiente B de la recta.

$$B = \sum f_i y_i - A \sum f_i x_i$$

(Villarrubia López, 2013, págs. 76-77).

La Tabla 3 muestra el proceso para el cálculo de los parámetros de la función densidad de probabilidad de Weibull.

Tabla 3. Cálculo de los datos estadísticos.

DATOS				CÁLCULOS					
Velocidades	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Relativa Acumulada	(yi)	(xi)	PRODUCTOS			
Vi	ni	fi=ni/N	Fi	ln (-ln(1-Fi))	ln(vi)	fi*xi	fi*xi ²	fi*yi	fi*xi*yi
m/s	horas								
0,5	2	0,0072	0,0072	-4,9345	-0,6931	-0,0050	0,0034	-0,0354	0,0245
1,5	11	0,0394	0,0466	-3,0425	0,4055	0,0160	0,0065	-0,1200	-0,0486
2,5	15	0,0538	0,1004	-2,2466	0,9163	0,0493	0,0451	-0,1208	-0,1107
3,5	18	0,0645	0,1649	-1,7138	1,2528	0,0808	0,1013	-0,1106	-0,1385
4,5	27	0,0968	0,2616	-1,1929	1,5041	0,1456	0,2189	-0,1154	-0,1736
5,5	37	0,1326	0,3943	-0,6905	1,7047	0,2261	0,3854	-0,0916	-0,1561
6,5	55	0,1971	0,5914	-0,1109	1,8718	0,3690	0,6907	-0,0219	-0,0409
7,5	47	0,1685	0,7599	0,3552	2,0149	0,3394	0,6839	0,0598	0,1206
8,5	34	0,1219	0,8817	0,7583	2,1401	0,2608	0,5581	0,0924	0,1978
9,5	21	0,0753	0,9570	1,1462	2,2513	0,1695	0,3815	0,0863	0,1942
10,5	7	0,0251	0,9821	1,3917	2,3514	0,0590	0,1387	0,0349	0,0821
11,5	5	0,0179	1,0000	-	-	-	-	-	-
TOTAL	279	1,0000				1,7104	3,2136	-0,3421	-0,0493

Nota: La tabla muestra los diferentes cálculos que se necesitan para calcular los parámetros de Weibull, Elaborado por: E. Lechón y I. Zhungur.

Utilizando los resultados de la tabla y remplazando en las ecuaciones (13) y (14) se obtiene:

$$A = \frac{-0,0493 - (1,7104)(-0,3421)}{3,2136 - (1,7104^2)} = 1,86$$

$$B = -0,3421 - 1,86(1,7104) = -3,523$$

Como $k = A \rightarrow k = 1,804$ y $B = -3,46$. Por lo tanto remplazando en la ecuación (12).

$$c = e^{-\left(\frac{-3,52}{1,86}\right)} \rightarrow c = 6,65 \text{ m/s}$$

Conocido el factor de forma $k = 1,86$ y el factor de escala $c = 6,65$ (m/s), remplazando en la ecuación (1) se tiene:

$$p(v) = \frac{1,86}{6,65} \left(\frac{v_i}{6,65}\right)^{1,804-1} e^{-\left(\frac{v_i}{6,65}\right)^{1,86}}$$

Se remplaza los valores de V_i para obtener cada uno de los valores de densidad de probabilidad de Weibull correspondientes.

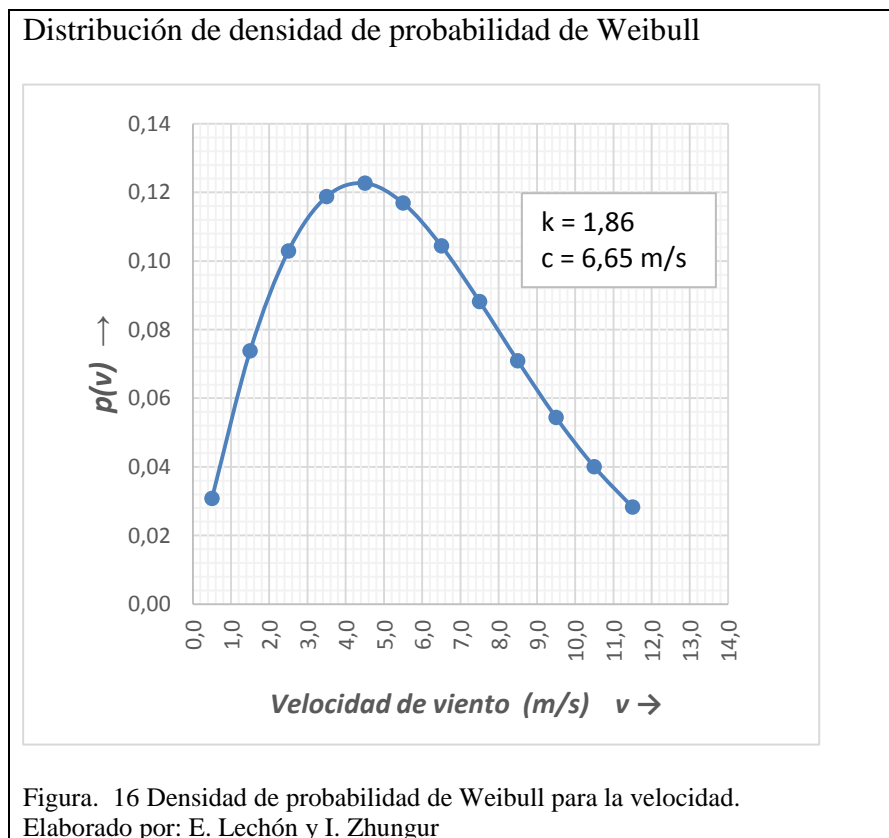
Tabla 4. Cálculo de la densidad de probabilidad de Weibull

Velocidades	Densidad de probabilidad de Weibull
V_i (m/s)	P (V)
0,5	0,0300
1,5	0,0730
2,5	0,1026
3,5	0,1190
4,5	0,1233
5,5	0,1177
6,5	0,1052
7,5	0,0888
8,5	0,0712

9,5	0,0545
10,5	0,0399
11,5	0,0281

Nota: La tabla muestra la densidad de probabilidad para las diferentes velocidades del banco de datos.
Elaborado por: E. Lechón, I. Zhungur.

Gráfica de la función de probabilidad de Weibull para la velocidad de viento del lugar de estudio.



La gráfica muestra la función densidad de probabilidad de Weibull para la velocidad de viento del lugar de estudio, con un factor de forma $k = 1,86$ y un factor de escala $c = 6,65 \text{ m/s}$. La misma que se asemeja a la gráfica de Frecuencia de velocidades de viento.

2.4. Análisis de la Potencia Eólica Disponible

Tomando en cuenta que una masa de aire m con velocidad v posee una energía cinética E_c que viene dada por:

Ecuación 15. Energía Cinética

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

El caudal másico de aire \dot{m} de densidad (ρ) que fluye a través de una superficie de área (A) perpendicular a la dirección de flujo está dado por:

Ecuación 16. Caudal másico

$$\dot{m} = \rho A v$$

La potencia disponible (P_d) asociada al caudal del aire que atraviesa esta sección es:

Ecuación 17. Potencia disponible

$$P_d = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

De donde se define la densidad de potencia o potencia por unidad de área:

Ecuación 18. Densidad de potencia por unidad de área

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3$$

Para corregir los efectos de la temperatura y altitud sobre el nivel del mar sobre la densidad se puede utilizar la expresión aproximada:

Ecuación 19. Densidad

$$\rho = 1,225 \left(\frac{288}{t + 273} \right) e^{-\left(\frac{h}{8435}\right)}$$

Donde:

- ρ es la densidad del aire kg/m^3
- t es la temperatura en grados centígrados ($^{\circ}C$)
- h es la altura sobre el nivel del mar (m)

También se define el potencial eólico disponible de un lugar como la potencia media eólica por unidad de superficie para un determinado período de tiempo, supuesta una densidad de aire constante.

Ecuación 20. Potencial eólico disponible en función de la V_m cúbica y de la V_m

$$\frac{\langle P_d \rangle}{A} = \frac{1}{2} \rho \langle V^3 \rangle = \frac{1}{2} \rho F_e \langle V \rangle^3$$

(Villarrubia, 2004, págs. 101-104).

Para el cálculo de la potencia disponible utilizamos la ecuación (20).

$$\frac{\langle P_d \rangle}{A} = \frac{1}{2} \rho F_e \langle V \rangle^3$$

Se determina la densidad, la velocidad media y el factor de energía del lugar de estudio con las ecuaciones (19), (5) y (10) respectivamente.

- **Densidad** $\rho = 1,225 \left(\frac{288}{t+273} \right) e^{-\left(\frac{h}{8435} \right)}$

Para la comunidad de La Chimba $h = 3200 \text{ m. s. n. m}$ y una temperatura promedio de $10^{\circ}C$ aproximadamente, remplazando en la ecuación (2.20) se obtiene:

$$\rho = 1,225 \left(\frac{288}{10 + 273} \right) e^{-\left(\frac{3200}{8435} \right)}$$

$$\rho = 1,225 (1,018)(0,684)$$

$$\rho = 0,85 \text{ kg/m}^3$$

- **Velocidad media** $\langle v \rangle = c \Gamma \left(1 - \frac{1}{k} \right)$

$$\langle v \rangle = 6,65 \Gamma \left(1 - \frac{1}{1,86} \right)$$

$$\langle v \rangle = 6,65 \Gamma(1,54)$$

Usando la tabla del Anexo 2 para la función gama tenemos.

$$\langle v \rangle = 6,65 (0,88818)$$

$$\langle v \rangle = 5,91 \text{ m/s}$$

- **Factor de energía** $F_e = \frac{\Gamma(1+\frac{3}{k})}{\Gamma^3(1+\frac{1}{k})}$

$$F_e = \frac{\Gamma \left(1 + \frac{3}{1,86} \right)}{\Gamma^3 \left(1 + \frac{1}{1,86} \right)}$$

$$F_e = \frac{\Gamma(2,61)}{\Gamma^3(1,54)}$$

$$F_e = \frac{1,61 \Gamma(1,61)}{\Gamma^3(1,54)}$$

Usando la tabla del Anexo 2 para la función gama tenemos.

$$F_e = \frac{1,61 (0,89468)}{(0,88818)^3}$$

$$F_e = 2,06$$

Reemplazando los valores de $\rho = 0,85 \text{ kg/m}^3$, $\langle v \rangle = 5,91 \text{ m/s}$ y $F_e = 2,06$ en la ecuación (20) tenemos:

$$\frac{\langle P_d \rangle}{A} = \frac{1}{2} (0,85) (2,06) (5,91)^3$$

$$\frac{\langle P_d \rangle}{A} = 180,7 \text{ W/m}^2$$

2.4.1 Selección de la turbina eólica

Se debe tomar en consideración que en el Ecuador son pocas las empresas que pueden brindar sistemas de energía renovable. Estas son las siguientes:

Tabla 5. Empresas proveedoras de sistemas eólicos

Empresa	Lugar	Proveedores en:
RENOVAENERGIA S.A	Quito - Ecuador	Long - Bow
PROVIENTO	Quito - Ecuador	ZONHAN- EXMORK

Nota: la tabla muestra las dos empresas con más renombre en el Ecuador que proveen sistemas eólicos. Elaborado por: E. Lechón e I. Zhungur

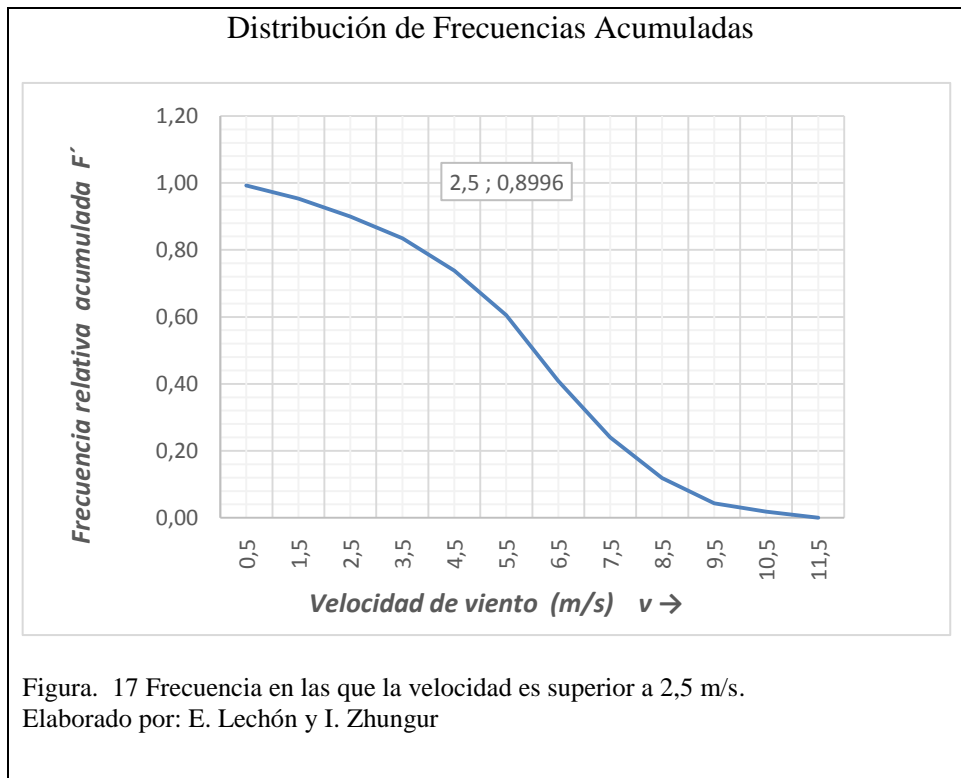
Estas empresas proporcionan una gran variedad de lo que son sistemas eólicos, en cuanto a modelos, tipos y la capacidad de generación de energía.

Para la selección de la turbina eólica se toma en cuenta la velocidad de arranque del sistema, considerando que las dos empresas antes mencionadas poseen turbinas con velocidad de arranque superiores a 2,4 m/s.

Tabla 6. Distribución de frecuencias del sector La Chimba 279 horas

Datos del mes de Junio				
Velocidades	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Relativa Acumulada	Frecuencia Relativa Acumulada Complementaria
Vi	Ni	fi=ni/N	Fi	Fi'
m/s	Horas			
0,5	2	0,0072	0,0072	0,9928
1,5	11	0,0394	0,0466	0,9534
2,5	15	0,0538	0,1004	0,8996
3,5	18	0,0645	0,1649	0,8351
4,5	27	0,0968	0,2616	0,7384
5,5	37	0,1326	0,3943	0,6057
6,5	55	0,1971	0,5914	0,4086
7,5	47	0,1685	0,7599	0,2401
8,5	34	0,1219	0,8817	0,1183
9,5	21	0,0753	0,9570	0,0430
10,5	7	0,0251	0,9821	0,0179
11,5	5	0,0179	1,0000	0,0000
TOTAL	279	1,0000		

Nota: La tabla muestra la distribución de frecuencias de las velocidades.
Elaborado por: E. Lechón y I. Zhungur



De los datos registrados en el mes de junio, se puede observar que el 89,96 % de las horas, 251 horas de las 279 horas, la velocidad será superior a 2,5 m/s lo que significa que las cifras son de gran utilidad para el aerogenerador ya que los proveedores en el Ecuador cuentan con aerogeneradores con velocidad de arranque de 2,5 m/s.

Tomando en cuenta estas consideraciones se elige un aerogenerador ZONHAN ZH 1KW cuyas características técnicas se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 7 Características técnicas Aerogenerador ZONHAN ZH 1KW

Diámetro del rotor (m)	2,8
Material y número de las cuchillas	Reforzado con fibra de vidrio * 3
Potencia nominal / Potencia máxima	1000 / 1500W
Velocidad nominal del viento (m / s)	8
Velocidad del viento de arranque (m / s)	2.5
Velocidad del viento de trabajo (m / s)	3 ~ 25

Velocidad del viento sobrevivido (m / s)	45
Velocidad nominal de rotación (r / min)	380
Tensión de trabajo	DC24V / 48V
Estilo generador	Trifásico, imán permanente
Método de carga	ahorro corriente de tensión constante
Método de regulación de la velocidad	freno de guiñada + Auto
Peso	70kg
Altura de la torre (m)	9
Capacidad del batería sugerido	batería 4pcs de ciclo profundo 12 V / 200 Ah
Vida util	15 años

Nota: la tabla muestra todas las características del aerogenerador que se usara en el para el cálculo del potencial eólico. Fuente: www.zonhan.com

Curva de potencia aerogenerador ZONHAN 1 KW

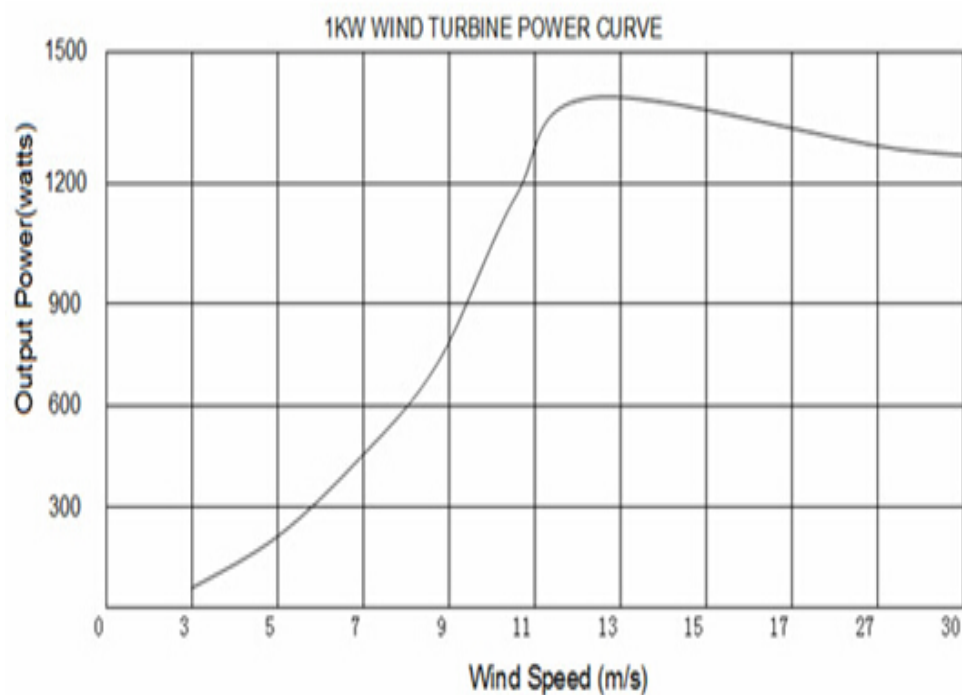


Figura. 18 Curva de potencia del aerogenerador.
Elaborado por: E. Lechón y I. Zhungur

2.4.1.1 Cálculo de la potencia máxima del lugar de estudio

Para el cálculo de la potencia del lugar se utiliza la expresión:

Ecuación 21. Potencia máxima

$$P_{max} = C_p * P_d$$

Donde C_p es el coeficiente de potencia.

La potencia máxima que teóricamente puede ser aprovechada de un flujo de viento es tan solo un 59,3% de la potencia disponible del mismo. En consecuencia, el valor máximo de coeficiente C_p es igual a 0,593. En la práctica este valor nunca se alcanza, pudiendo llegar a valores superiores a 0,4 en el mejor de los casos (Villarrubia, 2004, pág. 135).

Tabla 8. Potencia máxima del lugar de estudio

Velocidades	Potencia máxima
Vi	P max (W)
m/s	
0,5	0,1709
1,5	4,6144
2,5	21,3628
3,5	58,6196
4,5	124,5880
5,5	227,4714
6,5	375,4731
7,5	576,7964
8,5	839,6447
9,5	1172,2212
10,5	1582,7294
11,5	2079,3724

Nota: La tabla muestra la potencia máxima para cada una de las velocidades.
Elaborado por: E. Lechón e Israel Zhungur.

Grafica de potencia máxima en función del Velocidad

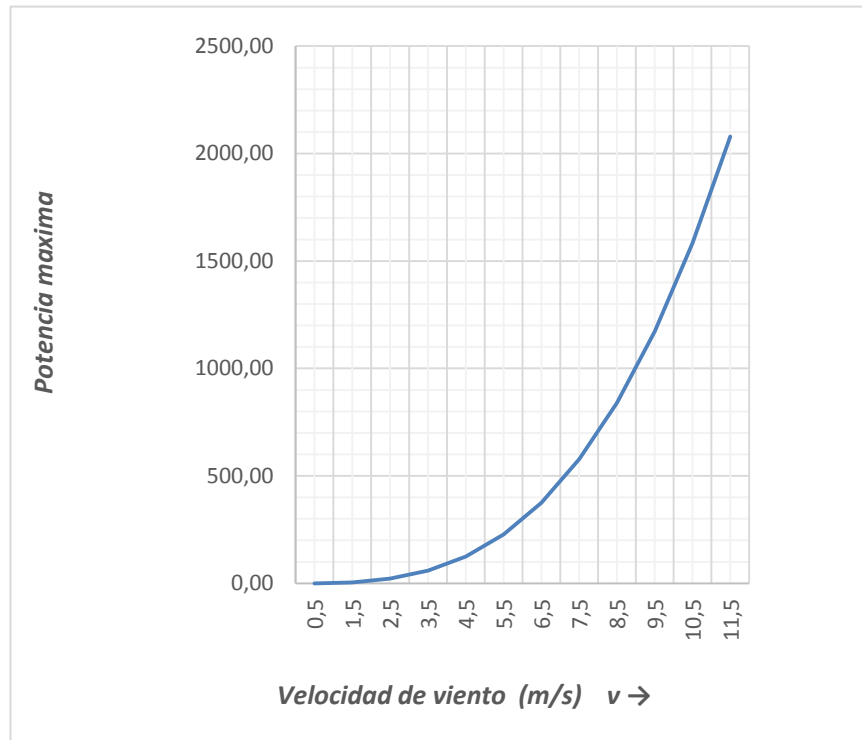


Figura. 19 Curva de potencia máxima en función de la velocidad.

Elaborado por: E. Lechón y I. Zhungur

La curva de potencia máxima calculada del sector de La Chimba (potencia-velocidad) es favorable con las características del aerogenerador ZONHAN ZH1KW.

Remplazando $A = \frac{\pi * D^2}{4}$ en:

$$\frac{\langle P_d \rangle}{A} = 180,7 \text{ W/m}^2$$

$$P_d = 180,7 * \left(\frac{\pi * (2,8^2)}{4} \right)$$

$$P_d = 1112,66 \text{ W}$$

Remplazando P_d y $C_p = 0,4$ en la ecuación (21) tenemos:

$$P_{max} = 0,4 * (1112,66W)$$

$$P_{max} = 445.06 W$$

2.4.2. Análisis exergético

Un sistema entrega el máximo trabajo posible cuando experimenta un proceso reversible del estado inicial especificado al estado de su ambiente, es decir el estado muerto. Esto representa el potencial de trabajo útil del sistema en el estado especificado y se conoce como exergía. Es importante saber que la exergía no representa la cantidad de trabajo que un dispositivo productor realmente entrega después de la instalación; sino que representa el límite superior en la cantidad de trabajo que un dispositivo puede entregar sin violar cualquier ley termodinámica (Cengel & Boles, págs. 430-473).

2.4.2.1. Modelo exergético eólico

Si partimos de un sistema de flujo, tendremos la ecuación general de exergía de un proceso de flujo:

Ecuación 22. Exergía de un proceso de flujo

$$\Delta X = (U_2 - U_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(S_2 - S_1) + \dot{m} \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right) + \dot{m}g(Z_2 - Z_1)$$

Donde:

$(U_2 - U_1)$ Es el cambio de la energía interna

$P_0(v_2 - v_1)$ Es el trabajo Pv con respecto a la presión externa

$T_0(S_2 - S_1)$ Es el calor transferido de los alrededores

$\dot{m} \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right)$ Es el cambio en la energía cinética del fluido

$\dot{m}g(Z_2 - Z_1)$ Es el cambio de la energía potencial del fluido

Realizando el análisis de cada de las ecuaciones anteriores tenemos que para un aerogenerador:

- No varia la T del aire fluyendo, por lo tanto, no hay cambio en la energía interna.
- Como no presenta flujo de calor no hay cambio de la entropía.
- No cambia el volumen porque la densidad es constante y el término PV se hace cero.
- También es posible considerar que no hay variaciones en la energía potencial.
- Cuando se extrae toda la energía cinética, se puede considerar que la velocidad final es cero

Quedándonos la ecuación como:

Ecuación 23. Exergía

$$\Delta X = \dot{m} \left(\frac{-V_1^2}{2} \right)$$

De donde se puede concluir que el potencial de trabajo o la exergía de la energía cinética de un sistema son igual a la propia energía cinética sin tener en cuenta la temperatura y la presión del ambiente.

Ecuación 24.Exergía de la energía cinética

$$X_{ec} = ec = \left(\frac{V^2}{2} \right)$$

(Cengel & Boles, págs. 430-473).

Remplazando $V=5,9$ m/s en la ecuación (24) tenemos:

$$x_{ec} = ec = \left(\frac{5,9^2}{2} \right) \left(\frac{m^2}{s^2} \right) \left(\frac{1 \text{ KJ/Kg}}{1000 \frac{m^2}{s^2}} \right)$$

$$x_{ec} = ec = 0.01741 \text{ KJ/Kg}$$

$$\dot{m} = \rho A V = \rho \frac{\pi(D^2)}{4} V$$

$$\dot{m} = (0,85) \frac{\pi(2,8^2)}{4} (5,9)$$

$$\dot{m} = 30,88 \text{ Kg/s}$$

Remplazando en la ecuación (23)

$$\Delta X = \dot{m} x_{ec}$$

$$\Delta X = (30,88 \text{ Kg/s})(0.01741 \text{ KJ/Kg})$$

$$\Delta X = 0,537 \frac{\text{KJ}}{\text{s}} = 537 \text{ W}$$

Como la exergía es el trabajo máximo que puede entregar un sistema, entonces:

$$P_{max} = 537 \text{ W}$$

2.4.3. Estimación del suministro de energía

Con la información de los datos obtenidos de la distribución de viento y la curva de potencia es posible determinar una estimación de la producción energía en el periodo de análisis, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 9. Estimación del suministro de energía

DATOS					
Intervalo de Velocidades	Velocidades	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Densidad de Potencia Eólica	
	Vi	ni	fi=ni/N	P max (W)	Energía Producida (Wh)
m/s	m/s	horas			
$0 \leq v \leq 1$	0,5	2	0,0072	0,1709	0,3418053
$1 < v \leq 2$	1,5	11	0,0394	4,6144	50,7580842
$2 < v \leq 3$	2,5	15	0,0538	21,3628	320,4424507
$3 < v \leq 4$	3,5	18	0,0645	58,6196	1055,1529016
$4 < v \leq 5$	4,5	27	0,0968	124,5880	3363,8766701
$5 < v \leq 6$	5,5	37	0,1326	227,4714	8416,4423296
$6 < v \leq 7$	6,5	55	0,1971	375,4731	20651,0205473
$7 < v \leq 8$	7,5	47	0,1685	576,7964	27109,4313264
$8 < v \leq 9$	8,5	34	0,1219	839,6447	28547,9188502
$9 < v \leq 10$	9,5	21	0,0753	1172,2212	24616,6454141
$10 < v \leq 11$	10,5	7	0,0251	1582,7294	11079,1054663
$11 < v \leq 12$	11,5	5	0,0179	2079,3724	10396,8621260
	TOTAL	279	1,0000		135607,9979718

Nota: La tabla Muestra la energía producida en el periodo de análisis del lugar de estudio.
Elaborado por: E. Lechón e I. Zhungur.

Lo estimado de energía producida en el período de análisis de 279 horas, se realizó multiplicando el número de horas de viento en cada intervalo por el nivel de

potencia, por lo tanto, la energía total es la suma de la distribución de energía. Esta energía es 135,607 KW h para un promedio de 11,6 días.

Este nivel de energía corresponde a una capacidad de generación diaria promedio 3.069 KWh/ día y esto equivale a 3069 Wh/día permitiendo un suministro de energía para un domicilio con un consumo básico.

3. Capítulo III: Estudio de Factibilidad Técnica

3.1. Valor Actual Neto (VAN):

Es el valor monetario que resulta de restar la suma de los flujos descontados a la inversión inicial.

El proyecto de investigación se realiza con una proyección económica de 10 años de flujos netos de efectivo con una tasa de interés del 12%.

Para poder obtener el flujo neto es necesario conocer el valor de las planillas eléctricas de las 2 viviendas en el transcurso de un año, lo cual se puede observar en la tabla 10:

Tabla 10. Valor de planillas eléctricas en dólares.

	Mes	Casa 1	Casa 2
Año 2015	Agosto	\$ 18,00	\$ 21,00
	Septiembre	\$ 17,00	\$ 22,00
	Octubre	\$ 20,00	\$ 23,00
	Noviembre	\$ 21,00	\$ 19,00
	Diciembre	\$ 22,00	\$ 24,00
AÑO 2016	Enero	\$ 18,00	\$ 20,00
	Febrero	\$ 17,00	\$ 21,00
	Marzo	\$ 18,00	\$ 20,00
	Abril	\$ 21,00	\$ 19,00
	Mayo	\$ 20,00	\$ 20,00
	Junio	\$ 18,00	\$ 21,00
	Julio	\$ 20,00	\$ 22,00
	Total	\$ 230,00	\$ 252,00

Nota: La tabla muestra el valor en dólares de consumo eléctrico, de cada vivienda durante un año.
Elaborado por: E. Lechón e I. Zhungur

Al sumar el total de la primera vivienda más el de la segunda vivienda se tiene un valor de \$ 482,00, que es el consumo en dólares durante un año de ambas viviendas.

El primer flujo neto es el promedio obtenido de las planillas eléctricas desde agosto del 2015 hasta julio del 2016 de dos viviendas del sector. Los siguientes valores del flujo neto fueron obtenidos con el valor inicial, aumentando un rango 5% por cada año transcurrido

Tabla 11. Valor de planillas eléctricas en dólares.

Periodos (n)	Valor Anual (\$)	Interés por año (5 %)
Año1	\$ 482,00	\$ -
Año2	\$ 506,10	\$ 24,10
Año3	\$ 531,41	\$ 25,31
Año4	\$ 557,98	\$ 26,57
Año5	\$ 585,87	\$ 27,90
Año6	\$ 615,17	\$ 29,29
Año7	\$ 645,93	\$ 30,76
Año8	\$ 678,22	\$ 32,30
Año9	\$ 712,13	\$ 33,91
Año10	\$ 747,74	\$ 35,61

Nota: La tabla muestra el valor en dólares durante los 10 periodos.
Elaborado por: E. Lechon e I. Zhungur

Como egresos se tiene el valor por mantenimiento de un aerogenerador que asciende al 1,5% del valor invertido por el producto, el cual se lo lleva acabo cada dos años.

Costo por mantenimiento cada dos años = al 1,5 % del costo del producto.

Costo por mantenimiento cada dos años = al 1,5 % de \$ 2550,00

Costo por mantenimiento cada dos años = \$ 38,25

El valor por mantenimiento es de \$ 38,25 cada dos años, lo cual da un total en los diez años de \$191,25.

El flujo neto se lo obtiene al sumar todos los ingresos y restar los egresos.

Tabla 12. Ingresos y Egresos.

Periodos (n)	Ingresos	Egresos
1	\$ 482,00	\$ -
2	\$ 506,10	\$ 38,25
3	\$ 531,41	\$ -
4	\$ 557,98	\$ 38,25
5	\$ 585,87	\$ -
6	\$ 615,17	\$ 38,25
7	\$ 645,93	\$ -
8	\$ 678,22	\$ 38,25
9	\$ 712,13	\$ -
10	\$ 747,74	\$ 38,25
Total	\$ 6.062,54	\$ 191,25

Nota: La tabla muestra los ingresos y egresos a obtener durante los diez años.
Elaborado por: E. Lechón e I. Zhungur

Con el valor de los ingresos y egresos se puede obtener el flujo neto de efectivo de cada período:

Flujo Neto de Efectivo (FNE):

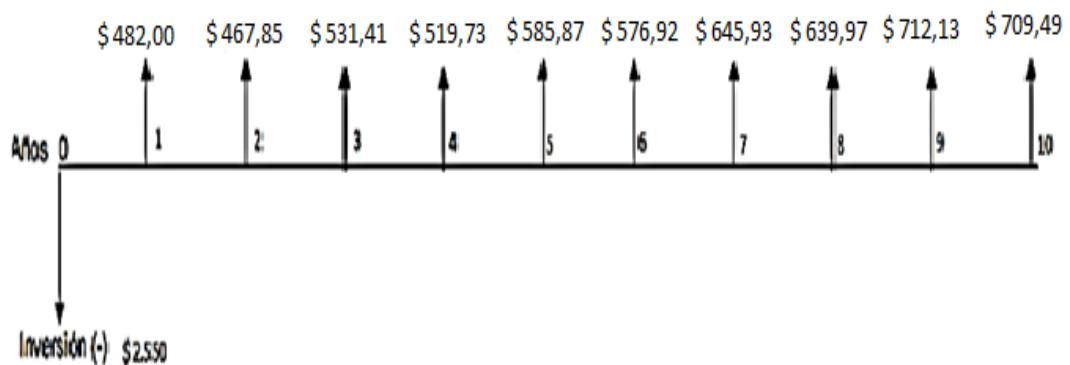


Figura. 20 Ingresos y egresos a obtener durante los diez años.
Elaborado por: E. Lechon e I. Zhungur

3.1.1. Cálculo del Valor Actual Neto.

El VAN se calcula por medio de una fórmula ingresada en Excel con los siguientes datos:

Tabla 13. Valor Actual Neto

	p0	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10
Inversión	-2.550	482,00	467,85	531,41	519,73	585,87	576,92	645,93	639,97	712,13	709,49

Tasa	12%
VAN	\$ 622,49

Nota: La tabla muestra la inversión inicial y el retorno que se tiene por año.
Elaborado por: E. Lechon e I. Zhungur

El resultado del Valor Actual Neto permite tomar una decisión para saber si se acepta o se rechaza un proyecto.

Tabla 14. Criterio para evaluar el VAN

Resultado	Decisión
$VAN > 0$	Se acepta
$VAN = 0$	Según criterio
$VAN < 0$	Se rechaza

Nota: La tabla muestra los valores para la toma de decisiones de acuerdo al resultado del VAN.
Elaborado por: E. Lechon e I. Zhungur

Por medio de la tabla, se puede concluir que el proyecto es factible económicamente ya que el valor del VAN es \$ 622,49.

3.2. Tasa Interna de Retorno (TIR):

La TIR es la tasa de interés real que genera el proyecto en “n” periodos.

Tabla 15. Tasa de Interés de Retorno

	p0	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10
Inversión	-2.550	482	467,85	531,41	519,73	585,87	576,92	645,93	639,97	712,13	709,49
TIR	17,23%										

Nota: La tabla muestra la Tasa de Interés de Retorno.

Elaborado por: E. Lechon e I. Zhungur.

El resultado obtenido en la Tasa Interna de Retorno es otro de los parámetros que ayuda a decidir si el proyecto es factible o no.

Este resultado indica que el proyecto es rentable en un 17,23 %, está en los creadores del proyecto arriesgarse o no a ejecutarlo.

4. Capítulo IV: Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

- Los datos registrados durante 279 horas del mes de junio por el anemómetro Kestrel 4500NV, determina que en el lugar de estudio existen vientos con velocidades promedio que van desde los 2,5 m/s hasta 13 m/s (Ver Anexo 1), velocidades que son compatibles con equipos de generación que existen en el mercado nacional.

- La frecuencia con la que se presente la velocidad de arranque de 2,5 m/s idónea para el aerogenerador ZONHAN 1KW es del 89.9 % del total de horas que se registraron los datos (Ver Anexo 3). Lo que permite aprovechar al máximo la generación de energía.
- El cálculo del Valor Actual Neto (VAN= 622,49\$) y la Tasa Interna de Retorno (TIR= 17,23%), determina que la implementación de aerogeneradores en la zona de estudio es factible a largo plazo.
- Tomando en consideración los datos registrados por anemómetro (Ver Anexo 1), el cálculo del VAN y el TIR, establece que la implementación de aerogeneradores en la zona de estudio es factible con un cierto grado de riesgo ya que presenta alto porcentaje de humedad lo que afecta al buen rendimiento del aerogenerador.
- La implementación de aerogeneradores solucionara el problema de desabastecimiento de energía que se tiene en la comunidad La Chimba, provocados por cortes repentinos.

4.2. Recomendaciones

- Seguir realizando las mediciones de los parámetros meteorológicos a lo largo de un año para tener datos precisos y facilitar el estudio de futuros proyectos que se puedan realizar en esta zona.
- Fomentar la implementación de sistemas eólicos en la comunidad ya que tienen un gran recurso eólico que se puede aprovechar, y es una fuente alternativa a los cortes de energía que tienen.

- Llevar a cabo estudios de la factibilidad económica previo a la instalación de un sistema eólico, ya que el mercado se pueden encontrar una gran variedad de aerogeneradores con bajo costo de inversión.
- Promover e incentivar a las empresas ecuatorianas que se encuentran dentro de este medio para la construcción de aerogeneradores en el país, para que sean más accesibles en cuanto a costos.

Referencias

- Ballard, M. (2003). *Conocimientos básicos en educación ambiental*. Barcelona: GRAO, de IRIEF, S.L.
- Briconatur. (7 de Octubre de 2012). *Energía eólica: Componentes principales de un aerogenerador*. Recuperado el 10 de Mayo de 2016, de Briconatur blog: <http://blog.briconatur.com/energia-eolica-componentes-principales-de-un-aerogenerador/>
- CEMAER, B. D. (8 de Enero de 2015). *Energía Eólica – Tipos de Turbinas de Viento*. Recuperado el 18 de Mayo de 2016, de BLOG DE CEMAER: <http://www.gstriatum.com/energíasolar/blog/2015/01/08/energía-eólica-tipos-de-turbinas-de-viento/>
- Cengel, Y., & Boles, M. (s.f.). *Termodinámica*.
- ECOVIVE. (3 de Febrero de 2010). *Los Aerogeneradores según el Número de Palas*. Recuperado el 10 de Mayo de 2016, de ECOVIVE: <http://www.ecovive.com/los-aerogeneradores-segun-el-numero-de-palas>
- Enríquez Harper, G. (2012). *El ABC de las energías renovables en los sistemas eléctricos*. México: Limusa.
- Escudero, J. (2004). *Manual de Energía Eólica*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Esteire, E., Madrid, A., & Madrid, A. (2010). *Energías Renovables Manual Técnico*. España: AMV.
- Global Wind Energy Council. (2016). *Global Wind Statistics 2015*. Creative Commons.

GOOGLE. (s.f. de s.f. de 2016). *GOOGLE*. Recuperado el 7 de Junio de 2016, de

GOOGLE MAPS: <https://www.google.com.ec/maps/@0.1295346,->

[78.2597851,8647a,20y,93.56h,66.76t/data=!3m1!1e3?hl=es-419](https://www.google.com.ec/maps/@0.1295346,-78.2597851,8647a,20y,93.56h,66.76t/data=!3m1!1e3?hl=es-419)

GUAIRICAJA USCA, B. A. (2013). Proyección de un parque eólico y mitigación del impacto ambiental en el proyecto eólico San Vicente de Tipin. Riobamba.

KestrelMeters. (s.f.). Obtenido de www.Kestrelmeters.com

KestrelMeters. (s.f. de s.f. de 2015). *Kestrel 4500 Weather Meter*. Recuperado el 18 de Mayo de 2016, de KestrelMeters:

<https://kestrelmeters.com/products/kestrel-4500-weather-meter>

Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (s.f. de s.f. de 3013). *MAPA*

EÓLICO ECUADOR. Recuperado el 20 de Abril de 2016, de Ministerio de

Electricidad y Energía Renovable: <http://www.energía.gob.ec/biblioteca/>

Moreno Figueredo, C. (s.f.). *Componentes de una turbina eólica de eje horizontal*.

Recuperado el 11 de Mayo de 2016, de Cubasolar:

<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia36/HTML/articulo03.htm>

NIELSEN KELLERMAN. (s.f. de s.f. de 2016). *Kestrel support*. Recuperado el 25

de Marzo de 2016, de nkhome: <http://www.nkhome.com/support/kestrel-support/>

OPEXenergy. (s.f.). *Eólica- Principales Elementos de los Aerogeneradores*.

Recuperado el 14 de Mayo de 2016, de OPEXenergy: [http://opex-](http://opex-energy.com/eolica/principales_elementos_aerogeneradores.html)

[energy.com/eolica/principales_elementos_aerogeneradores.html](http://opex-energy.com/eolica/principales_elementos_aerogeneradores.html)

PCE. (s.f.). *Anemómetro PCE-CWG1*. Recuperado el 16 de Mayo de 2016, de

Productos y soluciones inteligentes para aplicaciones técnicas:

https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/anemometro-pce-instruments-anem_metro-pce-cwg1-det_516038.htm

Ramírez, M. (21 de Noviembre de 2015). *Aerogeneradores verticales y de eje horizontal: como funcionan y tipos*. Recuperado el 7 de Mayo de 2016, de Energías renovables y verdes:

http://www.renovablesverdes.com/aerogeneradores-verticales/#Aerogeneradores_de_eje_horizontal

Roldán Vilorio, J. (2012). *Energías Renovables: Lo que hay que saber*. España: Paraninfo, S.A.

SANTILLAN CHICA, R. (2006). Estudio de prospección para la implementación de sistemas de autogeneración en la provincia de Chimborazo. Riobamba.

Sanz, D. (21 de Noviembre de 2012). *Componentes de un aerogenerador*.

Recuperado el 15 de Mayo de 2016, de Energías renovadas:

<http://energiasrenovadas.com/componentes-de-un-aerogenerador/>

Schallenberg, J., Piernavieja, G., Hernandez, C., Unamunzaga, P., Garcia, R., Diaz, M., . . . Subiela, V. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. Canarias: Instituto Tecnológico Canarias, S.A.

SlideShare. (19 de Febrero de 2010). *SlideShare*. Recuperado el 17 de Junio de 2016, de Funcion gama: <http://www.slideshare.net/juan.sandoval2/tablas-gamma>

Vasquez, A. (2005). *Vivir del Viento*. Debolsillo.

Villarrubia López, M. (2013). *Ingeniería de la Energía Eólica*. México: Alfaomega.

Villarrubia, M. (2004). *Energía Eólica*. España: Ceac.

ANEXOS